

THÈSES

présentées à

LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE PARIS

pour l'obtention du titre

de DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ de PARIS
en Optique Physiologique

par

Klaus-Jürgen WILHELM

PREMIÈRE THÈSE

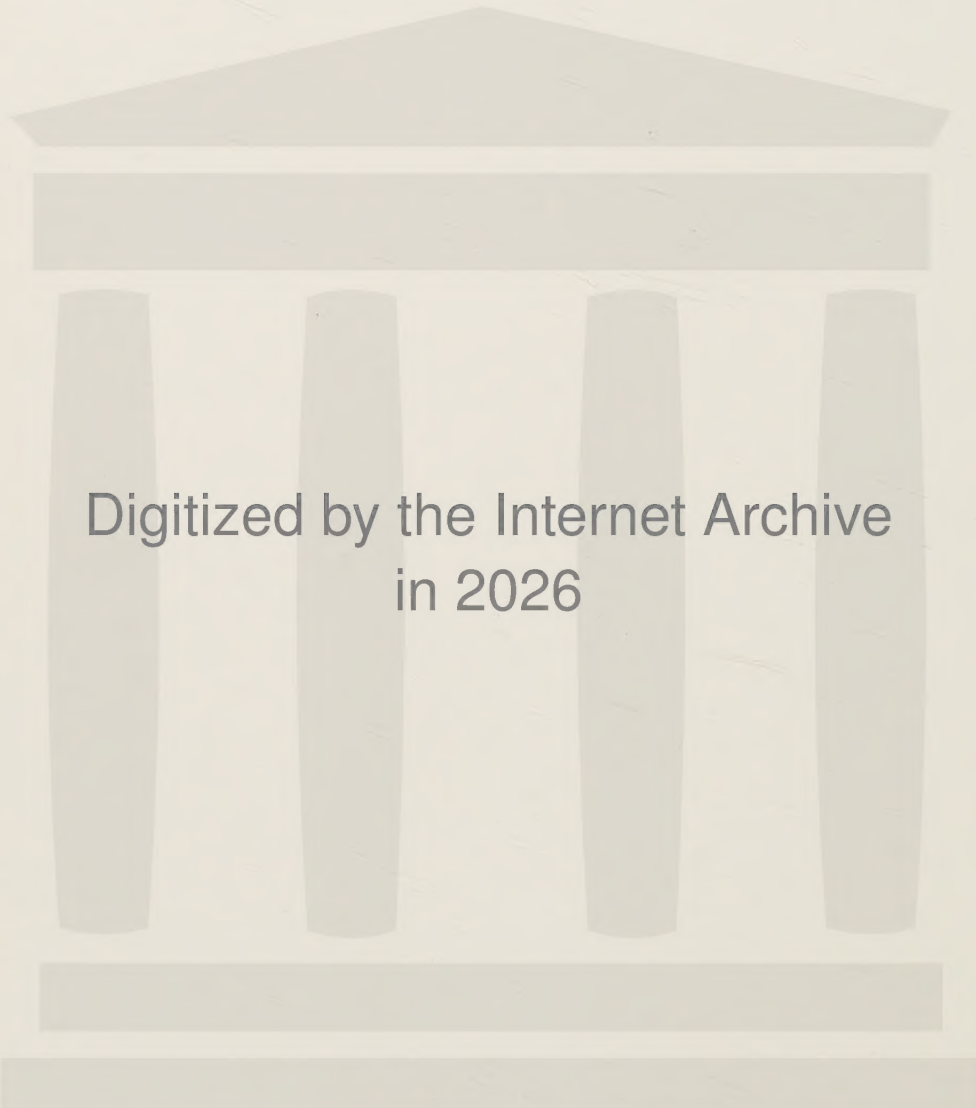
Quelques aspects du problème des seuils
différentiels de couleur

DEUXIÈME THÈSE

Proposition donnée par la Faculté

Soutenues le **10 DEC. 1969** 1969 devant la Commission composée de

MM. D. DERVICHIAN	Président
A. ARNULF	} Examineurs
Y. LE GRAND	
F. PARRA	Invité



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41550222_0007

THÈSES

présentées à

LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE PARIS

pour l'obtention du titre

de DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ de PARIS
en Optique Physiologique

par

Klaus-Jürgen WILHELM

PREMIÈRE THÈSE

Quelques aspects du problème des seuils
différentiels de couleur

DEUXIÈME THÈSE

Proposition donnée par la Faculté

Soutenues le

1969 devant la Commission composée de

MM. D. DERVICHIAN	Président
A. ARNULF	} Examineurs
Y. LE GRAND	
F. PARRA	Invité

THÈSES

Présentées à

LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE PARIS

Pour l'obtention du titre

de DOCTEUR en UNIVERSITÉ de PARIS
en Chimie Physique

par

Monsieur Louis WILLIAMS

Présentées le 10 Mars 1900



Thèse soutenue le 10 Mars 1900
à la Faculté des Sciences de Paris

DEUXIÈME THÈSE

Présentée devant le Jury le 10 Mars 1900

1900 Mars 10. Chimie Physique de

Présentée le

M. le Docteur WILLIAMS
2. 1900
Y. le Docteur
1. 1900

AVANT - PROPOS

Ce travail constitue une étape d'un ensemble de recherches concernant la métrique de l'espace des couleurs par la voie des seuils différentiels, il a été mené à ce point en collaboration avec Mademoiselle C. LEROY qui en a développé l'aspect plus théorique dans sa thèse de 3^{ème} cycle.

Nous avons ici développé l'aspect expérimental et la description du colorimètre différentiel dont la version actuelle due à nos soins constitue un perfectionnement de l'appareil conçu et réalisé par F. PARRA.

Naturellement les recherches communes ont pour conséquence la présence dans ce travail de points communs avec celui de Mademoiselle C. LEROY.

Nous avons essayé d'en dégager les aspects les plus pratiques.

SOMMAIRE

0.	Introduction	4
1.	Généralités	6
1.1	Bases de colorimétrie	6
1.2	Notion de seuil différentiel	8
2.	Principe et réalisation du colorimètre différentiel	11
2.1	Principe	11
2.2	Appareil	15
2.21	Dispositif lampe-lunette	15
2.22	Système des miroirs	17
2.23	Sélecteur	17
2.24	Système des bielles	21
2.25	Système de lecture	28
2.26	Lunette et pupille de sortie	31
3.	Réglage	33
3.1	Dispositif lampe-lunette	33
3.2	Réglage des miroirs	34
3.21	Mise au point d'un système destiné à rendre un miroir perpendiculaire à l'axe	34

3.22	Réglage du miroir perpendiculaire à l'axe	37
3.23	Réglage des miroirs d'un boîtier	37
3.24	Réglage de l'autre boîtier	38
3.3	Réglage du Wollaston	38
3.4	Réglage de la lunette	39
3.5	Centrage du sélecteur	39
3.6	Equilibrage	40
4	Mesures	41
4.1	Préparations et calculs	41
4.11	Sélection des filtres	41
4.12	Mise en place d'une couleur	42
4.13	Mise en place d'une direction	46
4.14	Calcul du seuil différentiel	48
4.2	Exécution des mesures	51
4.21	Mise en place d'une couleur	51
4.22	Mise à zéro des bielles	53
4.23	Mise en place d'une direction	55
4.24	Critère utilisé pour les mesures	56
5.	Résultats	58
5.1	Critique des résultats	58
5.2	Comparaison des deux sujets	65
5.3	Comparaison aux résultats de F.PARRA	66
5.4	Comparaison aux résultats de Mac ADAM	66
5.5	Comparaison aux résultats de BROWN	70

0. INTRODUCTION

Le présent travail fait suite aux importantes recherches dans le domaine de la sensibilité visuelle aux différences de couleurs. Si on mesure dans un diagramme chromatique la longueur du segment qui sépare d'un point le point représentatif, dans une direction donnée, de la couleur juste discernable, cette mesure représente le seuil différentiel. La courbe passant par l'extrémité de ces segments mesurés dans toutes les directions autour du même point est une indicatrice de seuil différentiel dans ce diagramme chromatique.

Chacun des points du diagramme peut être muni de son indicatrice et celle-ci renferme une zone de tolérance à l'intérieur de laquelle les couleurs sont confondues avec la couleur centrale.

Il serait difficile de citer tous les travaux qui, à un titre ou à un autre, ont gravité autour de ce sujet avec toutes ses répercussions dans la vie moderne.

Nous nous bornerons à citer les travaux de Mac ADAM ¹⁾ et F. PARRA ²⁾, qui semblent à première vue assez contradictoires.

Mac ADAM a publié en 1942 ses résultats sous forme (approximative) d'ellipses, qui sont généralement admises depuis ce temps-là.

F. PARRA a trouvé des courbes moins régulières et en général non centrées.

Notre travail s'articulait particulièrement sur la recherche de la forme de ces indicatrices. Les prochains chapitres traiteront principalement de la réalisation de telles mesures à l'aide d'un appareil que nous avons mis au point et modifié. La conception générale de ce colorimètre différentiel est identique à celle utilisée par F. PARRA pour ses mesures (1966).

Voici le plan que nous avons suivi :

- I- Généralités
(quelques notions de bases)
- 2- Principe et réalisation du colorimètre différentiel
- 3- Réglage de l'appareil
- 4- Mesures
- 5- Résultats
- 6- Conclusion

I. GENERALITES

I.1 Bases de colorimétrie : Rappel de quelques notions essentielles.

"La colorimétrie a pour but de fournir une spécification simple et précise de la couleur des sources lumineuses, et surtout de celle des " matériaux " transparents ou diffusants éclairés par ces sources en ce qui concerne leur effet sur l'oeil "3).

Le fait fondamental de la colorimétrie est exprimé par la première loi de Grassmann : il est nécessaire et suffisant, pour décrire un stimulus, de connaître trois grandeurs indépendantes, soit un vecteur dans un espace tridimensionnel, l'espace des couleurs. De même les lois d'additivité pour des vecteurs sont applicables aux mélanges de couleurs par addition. Le système le plus simple serait donc un espace ortho-normé avec trois composantes, réalisées par trois primaires : rouge, verte et bleue, choisies arbitrairement sous condition qu'elles soient distinctes et indépendantes. La couleur à décrire serait :

$$C = R (R) + G (G) + B (B)$$

avec $C = \text{stimulus}$

$(R), (G), (B) = \text{stimuli primaires}$

$R, G, B = \text{composantes trichromatiques}$

Dans beaucoup de cas il suffit de connaître la chromaticité d'une couleur, qui est donnée par la direction du stimulus C dans l'espace, sans tenir compte de la longueur de ce " vecteur ", qui représente l'intensité du stimulus. On réduit alors la représentation spatiale à un plan en rapportant chacune des trois composantes trichromatiques d'une lumière à leur somme.

$$r = \frac{R}{R+G+B}$$

$$g = \frac{G}{R+G+B}$$

$$b = \frac{B}{R+G+B}$$

Etant donné que $r+g+b = 1$, on peut abandonner une des coordonnées trichromatiques, et tracer par exemple un plan r, g pour représenter la chromaticité. Malheureusement le choix des trois primaires du système RGB présente l'inconvénient qu'il faut pour certaines chromaticités introduire des coordonnées négatives : autrement dit, il y a des couleurs réelles qui se trouvent à l'extérieur du triangle défini par RGB.

La Commission Internationale de l'Eclairage a proposé en 1931 un système de trois primaires irréelles XYZ. Comme les points représentant X et Y se trouvent sur l'achromie (c.à.d. le lieu des stimuli de luminance nulle), la composante trichromatique Y représente le flux lumineux de la lumière considérée,

et la luminance se confond avec Y . Les composantes trichromatiques X, Y, Z peuvent être obtenues par multiplication de la densité spectrale φ_λ de la grandeur énergétique caractérisant la lumière envisagée, par les coefficients de distribution $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ et intégration de ces produits sur toute l'étendue du spectre ⁴⁾ :

$$X = \int \varphi_\lambda \bar{x}_\lambda d\lambda$$

$$Y = \int \varphi_\lambda \bar{y}_\lambda d\lambda$$

$$Z = \int \varphi_\lambda \bar{z}_\lambda d\lambda$$

avec $\bar{y}_\lambda = V_\lambda$.

D'autre part les côtés XY et ZY du triangle sont tangents au lieu spectral. Une troisième condition est donnée en plaçant le point blanc (W), spectre d'égale énergie, au centre du diagramme ($x = y = 1/3$).

1.2. Notion de seuil différentiel.

A partir de cet outil fort utile qu'est l'espace des couleurs, il est relativement simple de se faire une image claire de la notion de seuil différentiel. Physiquement cet espace des couleurs est composé d'un continuum de couleurs. Cependant la physiologie de l'oeil ne permet pas de distinguer

deux couleurs séparées par une distance infiniment petite. Géométriquement, cela signifie qu'il faut une certaine distance entre les deux couleurs pour que l'oeil perçoive une différence juste discernable ⁵⁾. Cette distance qui représente une différence physique, correspond au seuil différentiel psychosensoriel. Si l'on examine, tout autour d'une couleur, dans l'espace, ces différences physiques nécessaires pour percevoir une différence, on obtient une surface indicatrice du seuil différentiel de couleurs ^{6,7)}.

En se contentant de mesurer dans une section de l'espace $Y = \text{constante}$, on détermine par conséquent une courbe indicatrice du seuil différentiel de chromaticité ^{I)}.

Des mesures dans la direction de l'axe Y , tout en gardant la chromaticité constante, donnent le seuil différentiel de luminance ^{8,9,10)}.

Une autre possibilité consiste en un déplacement dans le diagramme entre une couleur à l'intérieur du triangle et une couleur spectrale : on mesure le seuil de pureté ^{II)}.

Enfin, en comparant uniquement des couleurs spectrales en se déplaçant le long du lieu spectral, on obtient le seuil différentiel de couleurs de pureté constante égale à l'unité ^{12,13)}.

Des mesures analogues peuvent être effectuées avec une pureté différente de l'unité ¹⁴⁾.

Dans les travaux effectués ici, il s'agit des mesures du seuil différentiel de chromaticité à luminance constante, à l'intérieur du diagramme entier.

2. PRINCIPE ET REALISATION DU COLORIMETRE DIFFERENTIEL

2.1 Principe

Il s'agissait de trouver un système, qui permette de présenter une couleur quelconque dans un champ de vision, puis de modifier une moitié de ce champ en partant de cette couleur. Autrement dit : placer une couleur dans le triangle des couleurs x, y et avoir la possibilité de s'éloigner, à partir de ce point fixe, dans n'importe quelle direction de l'espace des couleurs, par exemple en gardant la luminance ou bien la chromaticité constante. Le premier cas aboutirait à des mesures de seuils différentiels des couleurs à luminance constante, le second à des mesures de seuils différentiels de luminance pour une position constante dans le diagramme.

Ceci pourrait être réalisé par exemple à l'aide de deux dispositifs comprenant chacun trois ensembles source-filtre, qui représenteraient les primaires d'un système colorimétrique: un rouge, un vert et un bleu. En changeant le rapport entre les intensités des sources (ou des flux lumineux), on pourrait changer la couleur obtenue par addition de ces trois primaires, et se déplacer à volonté dans le triangle défini par les primaires. Un des dispositifs fournirait le champ de comparaison. Après avoir mis en place une couleur identique pour les deux champs, on changerait le rapport entre les trois flux d'un dispositif

sans modifier l'autre pour s'éloigner de la couleur mise en place, sous certaines conditions données, par exemple en gardant la luminance constante et en se déplaçant dans le diagramme le long d'une droite de pente donnée, passant par la couleur de départ.

Dans le système utilisé pour nos travaux, l'addition simultanée des trois flux lumineux donnés par trois sources est remplacée par une addition temporelle. On éclaire les trois filtres successivement avec la même source à l'aide d'un système tournant formé de deux miroirs parallèles. En modifiant l'ouverture de trois diaphragmes qui se trouvent devant les trois filtres, on change la quantité des trois primaires, et ainsi la couleur obtenue par addition. Le rôle du deuxième dispositif est joué également par ces diaphragmes. En vérité il s'agit de deux demi-diaphragmes (appelés dans la description "secteurs": secteur extérieur et secteur intérieur). Leurs ouvertures peuvent être modifiées indépendamment. Cela permet de faire varier le flux passant par une moitié tout en gardant le flux passant par l'autre moitié fixe.

Ensuite on superpose les trois flux en ramenant le faisceau dans sa position de départ grâce à un système de deux miroirs parallèles symétrique au premier et solidaire de celui-ci.

Un système composé d'un condenseur et d'une lunette, placé après la source, permet de travailler avec un faisceau parallèle.

L'ensemble des miroirs montés dans deux boîtiers est mis en rotation par un moteur à vitesse réglable. La vitesse est choisie par l'observateur de façon à se trouver nettement au dessus de la fréquence de fusion. A la sortie des miroirs, on fait converger le faisceau dans la pupille de l'observateur à l'aide d'une lentille, dont on choisit la position de manière à avoir une image des secteurs à l'infini. Ainsi l'oeil est complètement désaccommodé.

Le dispositif décrit jusqu'à l'instant présente un inconvénient : les secteurs regardés dans la lunette et en particulier la ligne de séparation entre les demi-secteurs tournent avec le système de miroirs.

Pour redresser cette rotation et rendre immobile l'image de la ligne entre les demi-secteurs, on utilise un prisme de Wollaston lié aux boîtiers grâce à un roulement à billes et un système de pignons. Le Wollaston tourne avec une vitesse angulaire moitié de celle des boîtiers. Ainsi le champ reste immobile, et la ligne apparaît nette. Par la suite elle est utilisée comme ligne de séparation entre les deux demi-champs. Si les secteurs intérieurs et extérieurs sont ouverts de la même quantité, c-à-d. se trouvent dans le prolongement l'un de

l'autre, la ligne de séparation disparaît, et le champ est uniforme.

L'ouverture, respectivement la fermeture, des demi-secteurs d'un triplet se réalise à l'aide d'un système de bielles par action sur une seule commande.

La lecture du déplacement des secteurs, et ainsi de la couleur, se fait grâce à trois petits projecteurs solidaires des couronnes qui relient les bielles aux secteurs. De cette manière, les spots projetés se déplacent proportionnellement à la rotation des secteurs; cela permet de mesurer immédiatement celle-ci.

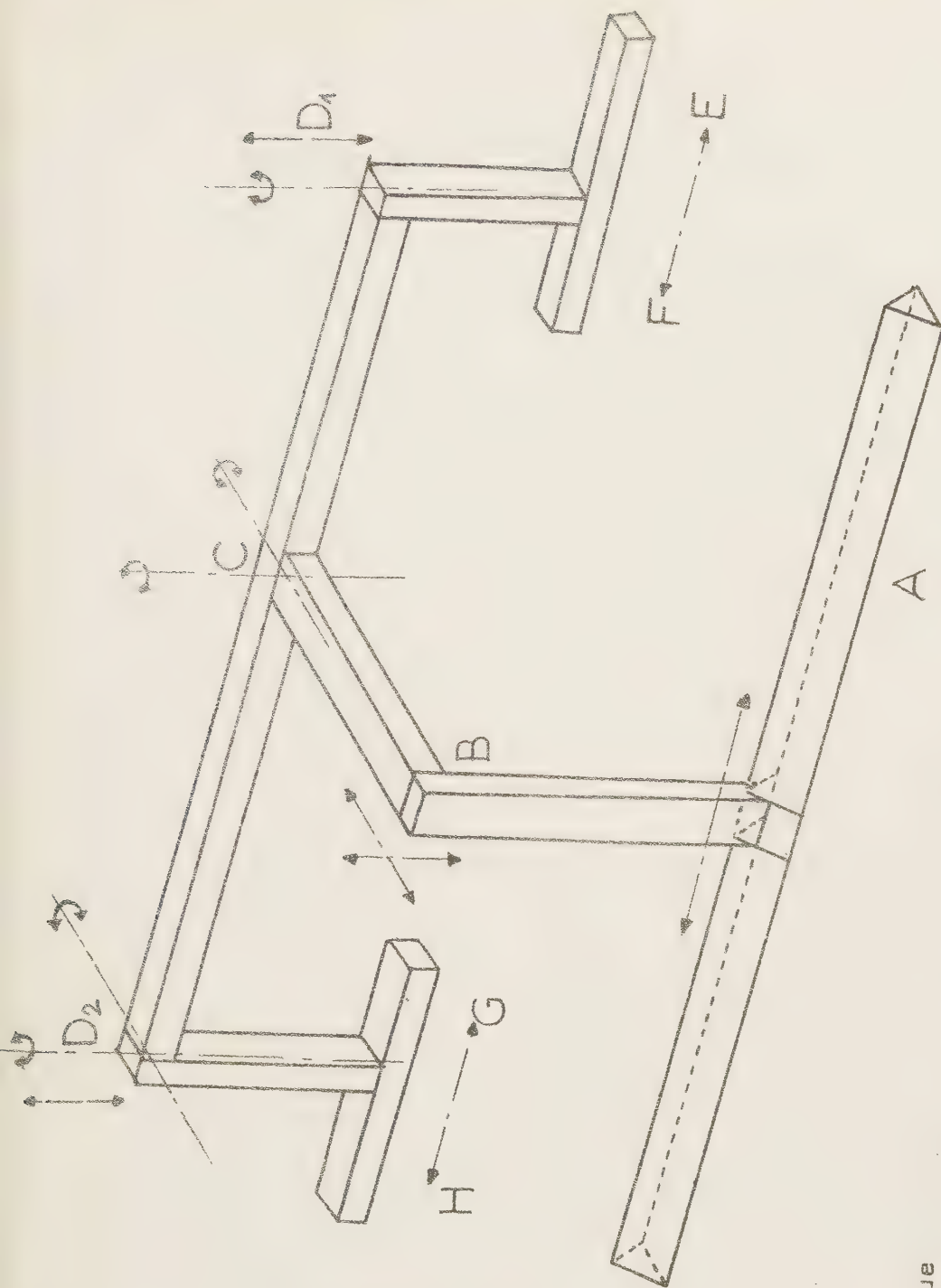
2.2 Appareil

2.21 Dispositif lampe - lunette (fig 1)

La source de l'ensemble est une lampe de projection étalonée. Un stabilisateur 1/1000 de volt fournit le voltage constant prescrit par le Laboratoire National d'Essais pour obtenir la lumière A. La lampe est montée sur un support qui comprend également un condenseur. La distance entre la lampe et le condenseur peut être réglée de manière à obtenir une image nette du filament sur un trou source.

Le trou source est monté dans un tube lié à la lunette. La distance entre la lentille et le trou source est réglée de sorte que le trou source se trouve au foyer de la lentille. Ces deux ensembles lampe-condenseur et trou source-lunette doivent fournir un faisceau parallèle à l'entrée du système de miroirs tournant.

Pour avoir la possibilité de régler l'inclinaison du dispositif complet, ultérieurement, sans modifier la position relative des deux ensembles, ces derniers sont montés sur un seul support, réglable en inclinaison autour de deux axes perpendiculaires à l'axe optique, en translation dans deux directions perpendiculaires à ces axes.



- A : Banc optique
 B : réglable en translation (deux directions)
 C : réglable en rotation (deux axes)
 D : réglable en hauteur et en rotation (un axe)
 D₂ : réglable en hauteur et en rotation (deux axes)
 F : distance entre condenseur F et filament E variable, F et E mobiles
 HG : distance entre lentille H et trou source, G variable, H fixe

FIG. 1

2.22 Système des miroirs (fig.2)

Le système des miroirs comprend quatre miroirs plans d'une épaisseur de cinq millimètres. Ils sont montés deux à deux parallèles, avec un angle de 45° par rapport à l'axe optique, dans des boîtiers qui sont liés à l'aide d'un axe. Lorsque l'ensemble tourne, le faisceau parallèle se déplace parallèlement à lui-même autour de l'axe entre les deux boîtiers. Il est ramené à la sortie du deuxième boîtier dans l'axe de rotation, identique à l'axe optique de l'appareil. L'inclinaison des deux miroirs intérieurs ne peut être réglée que de l'intérieur des boîtiers. Etant donné que les boîtiers peuvent être ouverts dans le plan perpendiculaire à l'axe, cette opération ne présente aucune difficulté. De même le remplacement des miroirs est assez facile.

Les miroirs extérieurs peuvent être orientés de l'extérieur à l'aide de trois vis de réglage permettant de changer l'inclinaison dans toute direction désirée. Une fois réglés, ils sont fixés grâce à des écrous de blocage.

2.23 Le sélecteur.

Le système des diaphragmes qui modifient les flux traversant les trois filtres (nos primaires) est réalisé par un ensemble appelé sélecteur.

Schéma général du colorimètre différentiel

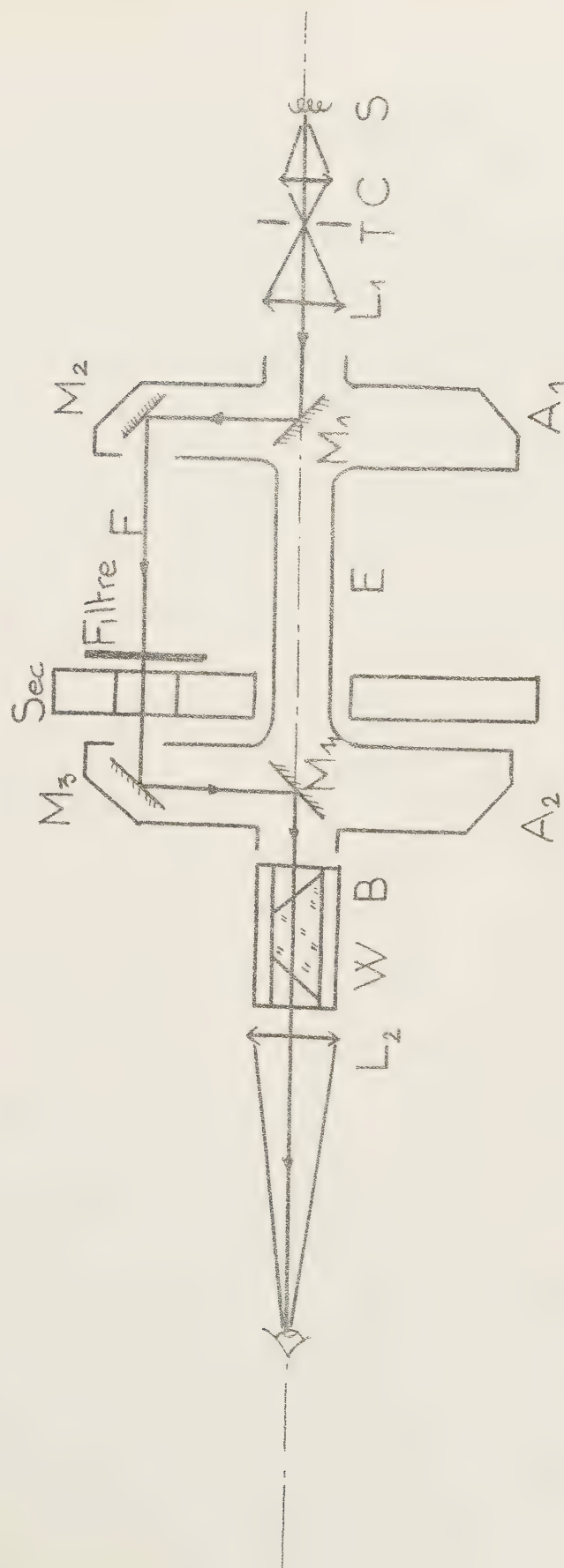


FIG. 2

Cet ensemble est composé d'un disque divisé en dix secteurs de 36° chacun. Cinq de ces secteurs sont évidés afin de laisser passer la lumière, les cinq autres secteurs sont pleins. Les cinq secteurs peuvent être plus ou moins fermés à l'aide de plaquettes glissant dans des rainures circulaires concentriques. En réalité il s'agit de deux plaquettes, qui servent à diaphragmer la moitié extérieure, ou la moitié intérieure du faisceau. Ces deux demi-secteurs (demi-secteurs intérieur et extérieur) peuvent être manipulés indépendamment par une tige (fig.3).

Comme en général une moitié du champ conserve au cours des mesures une couleur constante (par exemple celle correspondant aux trois demi-secteurs intérieurs), il suffit de déplacer les trois demi-secteurs extérieurs pour modifier la moitié de comparaison du champ.

Trois couronnes, de diamètres différents peuvent tourner autour de l'ensemble, dans des plans perpendiculaires à l'axe optique. Elles sont attachées aux tiges des secteurs mobiles avec des cavaliers, et permettent ainsi de modifier l'ouverture des secteurs. Lors de l'utilisation on attache d'abord trois secteurs intérieurs aux couronnes pour mettre une couleur en place. Une fois en place, on les bloque solidement pour les utiliser par la suite comme repère de la couleur désirée. On attache alors aux couronnes les trois demi-secteurs extérieurs. Il s'agit maintenant de faire tourner les trois

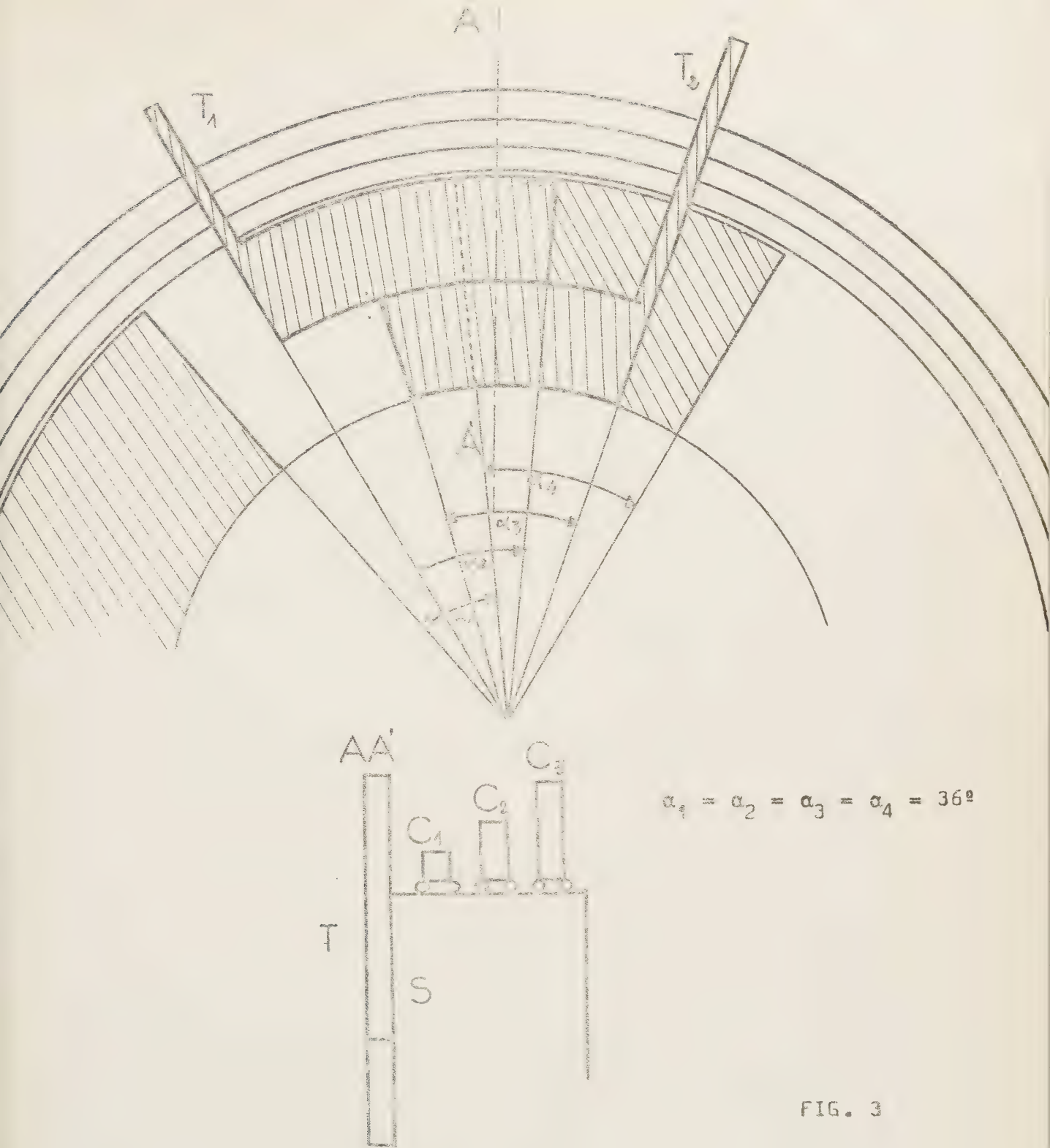


FIG. 3

C_1, C_2, C_3 : couronnes

S : secteurs

T_1, T_2 : tiges

$\alpha_{1,2,3,4}$: angle d'un
secteur complètement
ouvert.

couronnes, et ainsi les demi-secteurs extérieurs.

Les secteurs ont été construits au début au nombre de cinq avec l'idée de créer un appareil destiné non seulement à des mesures de seuils différentiels de couleur mais aussi à des utilisations plus générales en colorimétrie. Pour les mesures de seuils différentiels, il suffit bien sûr de trois secteurs et aussi de trois couronnes.

A l'aide du quatrième secteur on pourrait par exemple comparer une couleur obtenue par addition de trois primaires avec un échantillon. Une autre possibilité serait de faire une équation hétérochromatique de luminance entre deux couleurs réalisées par trois, respectivement deux filtres primaires, convenablement choisis.

2.24 Système de bielles (fig.4)

Le système est composé de trois bielles qui sont attachées aux couronnes. Leur principe consiste en trois tiges qui tournent autour d'un axe commun, mais dont la longueur effective est variable. Le fonctionnement est décrit par le schéma de la fig.4 pour une bielle. La commande unique (A) entraîne une translation d'un téton (B). Celui-ci, glissant dans une rainure du grand disque provoque sa rotation autour du centre (C). Le grand disque est tenu par trois petits galets. La rotation entraîne une translation d'un autre téton, lié à la bielle,

dans une lumière passant par le centre du disque. Finalement, à la suite de cette translation, la bielle tourne autour de son centre de rotation (C_R). L'extrémité de la bielle (E) entraîne la couronne et ainsi le secteur lié à celle-ci.

La position du téton (D) peut être réglée grâce à la commande de bielles (C_B). Au moyen d'une vis de réglage on modifie sa position relativement à la bielle en le faisant glisser dans une rainure de la bielle. Ainsi on fait varier la longueur effective (ED) de la partie qui est actionnée par la couronne. En effet l'angle de rotation de la bielle et le déplacement de la couronne (E) augmente pour une même rotation du disque autour de C, si la distance entre D et C_R diminue.

Au cas où le téton (D) se trouve au centre de rotation C, une rotation du disque n'entraîne plus de mouvement de la bielle. D'autre part, pour la position du disque $\alpha = 180^\circ$, c.à.d. C_R , D et C dans le prolongement, un réglage de la commande de bielle ne provoque aucun mouvement. Pour les autres positions, un réglage de D entraîne également une rotation de la bielle autour de C_R , étant donné que le disque reste immobile.

En dépassant avec le téton le point C de la rainure, on change évidemment le sens de la rotation autour de C_R , pour le même sens de rotation du disque.

La rotation de la commande unique A, et ainsi la translation du téton B entraîne également deux autres dispositifs identiques à celui qui vient d'être décrit. En changeant la position du téton D avec la commande de bielle pour chacune des trois bielles, on affiche le rapport désiré entre les déplacements des secteurs. Grâce à la conception de l'ensemble, il est de plus possible d'avoir tant des rapports positifs (déplacement de deux bielles dans le même sens : par exemple ouverture de deux secteurs), que des rapports négatifs (déplacement de deux bielles dans des sens opposés : par exemple ouverture d'un secteur et fermeture de l'autre).

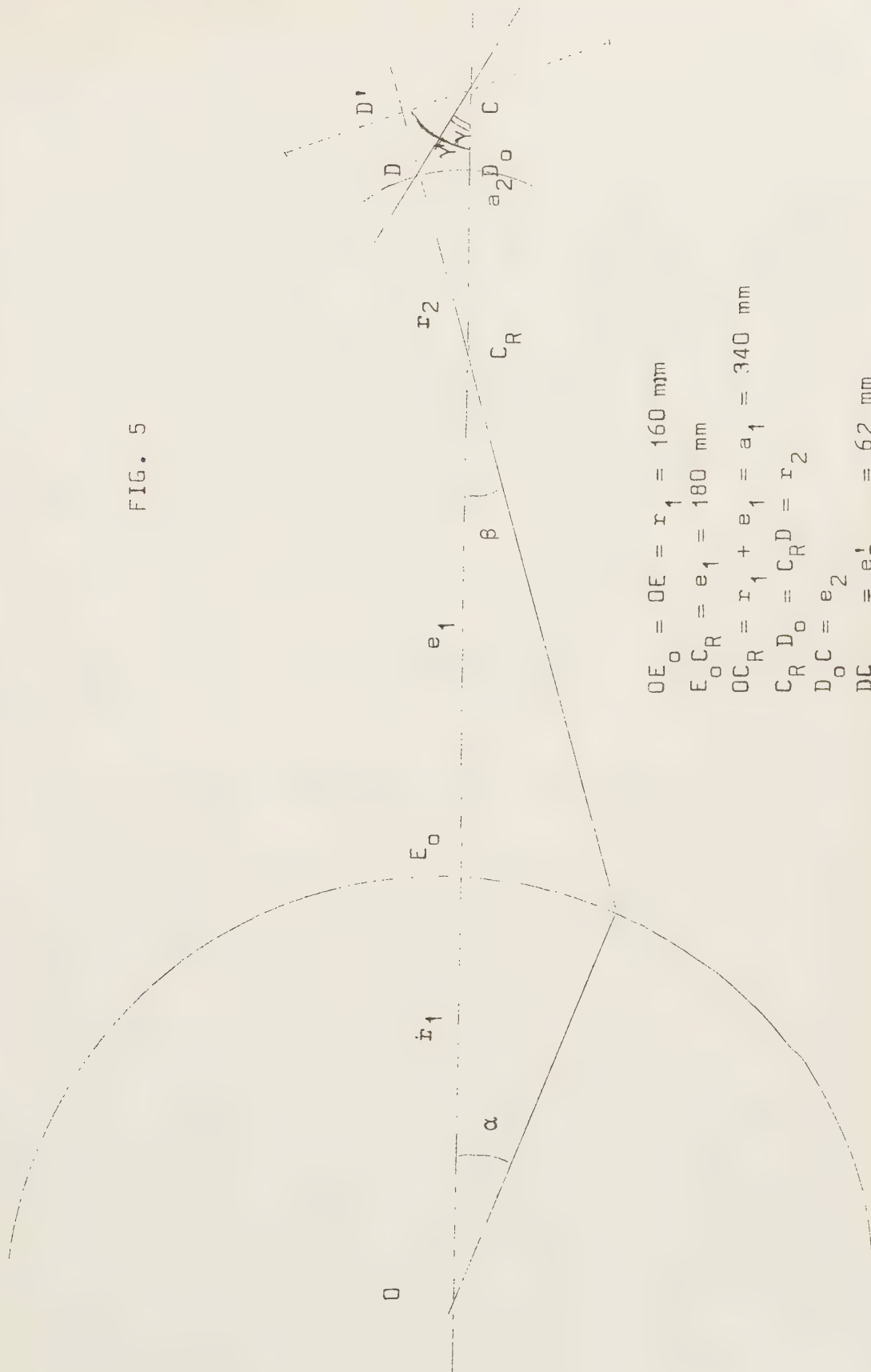
Le cas idéal pour le système des bielles serait une fonction rigoureusement linéaire entre l'angle α (rotation de la couronne) et l'angle γ (rotation du disque), afin d'avoir un rapport absolument constant entre les déplacements des secteurs des trois couronnes. Examinons les conditions pour lesquelles cela est réalisé. (fig. 5).

Il résulte de la géométrie du dispositif la relation suivante entre α et γ

$$\frac{\frac{a_1}{r_1} - \cos \alpha}{\sin \alpha} = \frac{\frac{a_2}{e_2} - \cos \gamma}{\sin \gamma} \quad (1)$$

avec e_2' fonction de γ

FIG. 5



$$OE_o = OE = r_1 = 160 \text{ mm}$$

$$E_o C_R = e_1 = 180 \text{ mm}$$

$$OC_R = r_1 + e_1 = a_1 = 340 \text{ mm}$$

$$C_R D_o = C_R D = r_2$$

$$D_o C = e_2$$

$$DC_{\max} = e_2'_{\max} = 62 \text{ mm}$$

$$C_R C = r_2 + e_2 = a_2 = 95 \text{ mm}$$

$$r_2^2 = a_2^2 + e_2'^2 - 2 a_2 e_2' \cos \gamma \quad (2)$$

Il est évident qu'on a tout intérêt à travailler avec des petits angles, pour avoir une relation quasi constante entre α et γ . Dans le cas de cette approximation, l'équation (2) devient (pour γ très petit):

$$e_2' = a_2 - r_2 = \text{constante}$$

et l'équation (1) :

$$\gamma = \alpha \left(\frac{\frac{a_2}{e_2'} - 1}{\frac{a_1}{r_1} - 1} \right)$$

Durant le réglage il est possible de changer l'angle β , soit en actionnant la commande unique (en gardant $r_2 = \text{cste}$), soit en modifiant la longueur r_2 à l'aide de la commande de bielle (en gardant $\gamma = \text{cste}$). Etant donné, qu'il est plutôt préférable de travailler avec un petit angle γ , on choisit pour un angle β donné le γ minimal, qui correspond évidemment à la valeur maximale de e_2' . La construction de l'appareil ne permet pas de dépasser 62 mm pour e_2' . Par conséquent on s'arrange toujours, en mettant une couleur en place, pour avoir e_2' maximal avec la bielle qui provoque la plus grande rotation de l'angle α_1 . Le γ associé à cet angle reste constant par la suite, et le réglage se fait par modification de e_2' et

ainsi de l'angle β . A l'angle α_2 , respectivement α_3 , inférieurs à α_1 , correspond un angle β_2 , respectivement β_3 , inférieurs à β_1 , car β est toujours inférieur à α par raison de construction.

En d'autres termes : pour calculer l'erreur maximale possible sur la linéarité du système entier des trois bielles, il suffit de considérer le cas de l'angle α maximal pour un e'_2 maximal, puisque les angles α plus petits pour cette position de l'angle γ sont entachés d'erreurs plus petites.

Le système de lecture expliqué ultérieurement interdit de dépasser un angle α de 6° .

Par conséquent le calcul de l'erreur maximale s'exécute avec

$$\alpha = 0,1047$$

$$\text{et} \quad e'_{2 \max} = 62 \text{ mm}$$

a) valeur exacte de $\gamma_1 = \gamma_1(\alpha)$

$$\beta = \text{Arc ctg} \left(\frac{\frac{a_1}{r_1} - \cos \alpha}{\sin \alpha} \right) = 0,092172 \text{ rad}$$

$$\gamma_1 = \text{Arc sin} \left(\frac{a_2}{e'_2} \sin \beta \right) - \beta = 0,04933 \text{ rad}$$

b) valeur approchée : cas linéaire $\gamma_2 = \gamma_2(\alpha)$

$$\gamma_2 = \alpha \left(\frac{\frac{a_2}{e_2} - 1}{\frac{a_1}{r_1} - 1} \right) = 0,049545 \quad \text{rad}$$

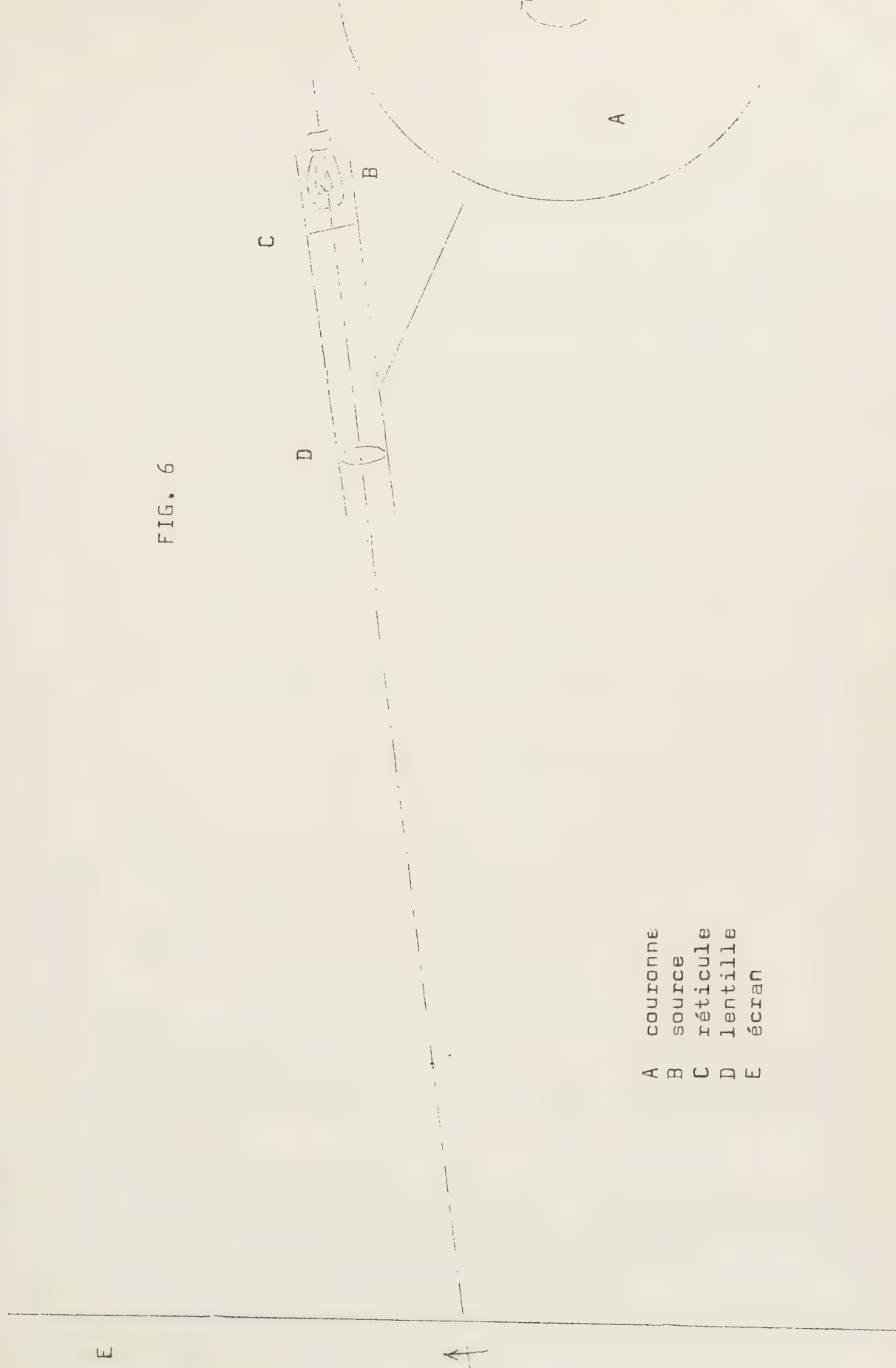
L'erreur est donnée par

$$\Delta E = \left| \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_2} \right| = 4,3 \cdot 10^{-3}$$

2.2 5 Système de lecture

Il était nécessaire de trouver un système qui donne immédiatement la modification de l'angle des secteurs. Comme les trois secteurs dont on veut mesurer l'angle d'ouverture sont liés rigidement aux trois couronnes pendant les mesures, il suffit de mesurer l'angle de rotation des couronnes. Pour cela un petit projecteur est monté sur la couronne, de façon que son axe optique tourne dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation des couronnes (confondu avec l'axe optique de l'appareil) du même angle que celle-ci (fig.6). L'image d'un réticule est projetée sur un écran. Pour obtenir une meilleure exactitude, l'écran se trouve à une distance assez grande, dans notre cas 460 cm. L'image du réticule sur l'écran (papier millimétré) a une largeur d'un millimètre. En utilisant toujours pour repère des mesures le bord supérieur du trait mis

FIG. 6



- A couronne
- B source
- C réticule
- D lentille
- E écran

au point, on atteint ainsi une exactitude de 0,5 mm pour la lecture. Pour des raisons pratiques l'écran est plan et non circulaire de rayon 460 cm, ce qui implique qu'on lit la tangente au lieu de l'angle.

Supposons qu'on travaille avec des petits angles : dans ce cas-là un déplacement du spot est donné par :

$$d = \alpha \cdot r$$

avec r = distance entre le centre de rotation et l'écran, α en rad.

Un déplacement d'un millimètre par exemple correspond à :

$$\alpha = \frac{d}{r} = 0,0002174 \quad \text{rad}$$

$$\alpha = 44,9''$$

Ainsi on peut atteindre une exactitude de lecture de 22,5".

Afin de rester dans les petits angles, on s'est donné comme angle de rotation maximal 6°. Selon le calcul ci-dessus cette valeur correspond à un déplacement du spot de

$$d = 480 \text{ mm} .$$

En prenant la tangente au lieu de l'angle on commet dans ce cas une erreur de $2^\circ/_{99}$. Comme les ouvertures des secteurs par la suite sont calculées directement en mm lus

sur l'écran, il suffit de ne pas dépasser 480 mm pour avoir une erreur de lecture inférieure ou égale à $2^{\circ}/_{00}$.

Les mesures de seuils restent inférieures à 100 mm, cette condition est alors amplement remplie. Au cas où la mise en place d'une couleur exige de dépasser cette limite, on opère en plusieurs pas, en remettant le spot à la position zéro après un déplacement maximal de 480 mm.

Pour la mise en place d'une direction on reste dans cette limite de 6° sans jamais remettre le système de lecture, une fois réglé, à la position zéro du système des bielles (cf. 2.4 4)

Naturellement il y a trois dispositifs identiques pour les trois couronnes respectives. Les considérations ci-dessus sont, bien sûr, applicables de la même manière.

2.2 6 Lunette et pupille de sortie.

A condition de ne pas avoir de perte le long d'un chemin optique, et de travailler dans le même milieu, la luminance est invariante.

La deuxième condition est parfaitement vérifiée, la première approximativement (sauf absorption par la lentille de la lunette). Cette loi nous autorise à faire converger le faisceau parallèle dans l'oeil : la lentille sera considérée

par l'oeil comme une source secondaire ayant la luminance qu'il reçoit (maxwellian view, vision en lumière dirigée). La lentille est placée derrière le prisme de Wollaston, de façon que les secteurs se trouvent à la distance focale de celle-ci. L'oeil accommodé sur l'infini, est au point sur les secteurs, et en conséquence, aussi sur la ligne de séparation.

A l'extrémité de la lunette se trouve un trou pour faciliter le centrage de l'oeil dans l'axe optique. La lunette elle-même peut être centrée grâce à un montage sur cavalier, permettant de la translater dans deux directions perpendiculaires.

Voici finalement les conditions d'expérimentation:

luminance	:	270 cd/m^2
éclairage rétinien	:	1325 Trolands
angle d'ouverture	:	$3^{\circ}10'$
diamètre de la pupille		
de sortie	:	2,5 mm

3. REGLAGE

3.1 Dispositif lampe - lunette

Il s'agit d'abord de régler les positions relatives de la lampe, du condenseur, du trou source et de la lunette. En fait, comme le trou devant la lunette sert de source secondaire placée au foyer de celle-ci pour qu'un faisceau parallèle traverse les boîtiers, il suffit de bien éclairer le trou source, c.à.d. de former une image du filament à son niveau.

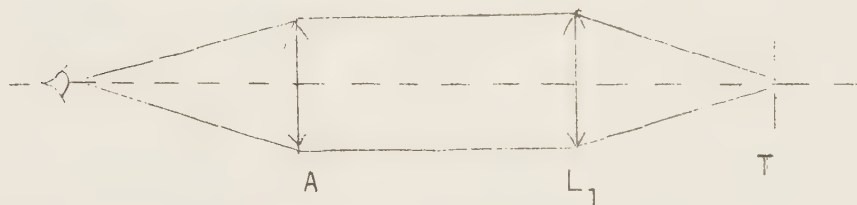
Il n'est plus nécessaire par la suite de modifier le réglage de ces éléments. La source, une lampe étalon A, type lampe projecteur, est alimentée par un voltage stabilisé de 12,56 volts.

Ensuite le dispositif (lampe-lunette) D_1 doit être réglé parallèlement à l'axe de rotation du système. Dans ce but, le trou source est remplacé momentanément par un autocollimateur, L_1 étant elle-même l'objectif de l'autocollimateur, sans que la position de la lunette par rapport à D_1 soit modifiée.

Un miroir M_R , monté sur un support qui peut entrer dans l'axe creux de l'appareil, est réglé perpendiculaire à l'axe optique à l'aide de trois vis, qui fixent la position

du miroir. La perpendicularité est réalisée quand l'image réfléchie du réticule est immobile lors de la rotation du miroir avec le système des boîtiers. Pour rendre L_1 parallèle à l'axe (c.à.d. perpendiculaire au miroir) il suffit de faire coïncider le réticule et son image, en réglant l'inclinaison de la lunette.

Après avoir remplacé le réticule par le trou source, on détermine la position de T, au foyer de L_1 . Dans ce but on règle un autre autocollimateur A sur l'infini. Puis on le place devant L_1 . Le trou source se trouve au foyer de L_1 , lorsqu'on voit nette son image au niveau du réticule.



3.2 Réglage des miroirs.

Les miroirs doivent être réglés deux à deux parallèles et à 45° de l'axe de rotation des boîtiers.

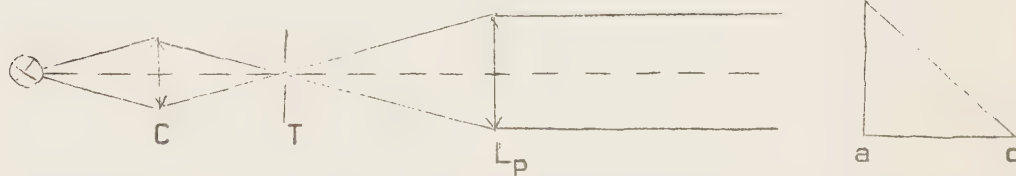
3. 2 1 Mise au point d'un système destiné à rendre le miroir

M_p perpendiculaire à l'axe de rotation.

Le miroir M_p sera situé de part et d'autre, derrière le bord extérieur du premier boîtier.

Il faut un système translatant le faisceau d'entrée à cette hauteur en le laissant rigoureusement parallèle à lui-même. Ceci est réalisé grâce à deux miroirs parallèles.

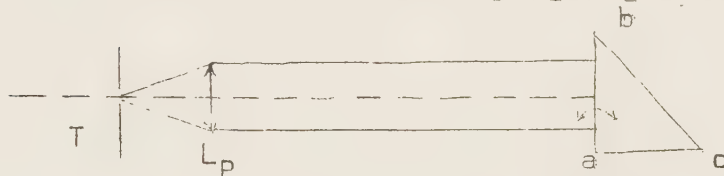
Les éléments suivants sont nécessaires :



Ce dispositif permet de travailler avec un faisceau parallèle (C : condenseur, T : trou, L_p : lentille, P :prisme), et ainsi d'utiliser le principe d'autocollimation.

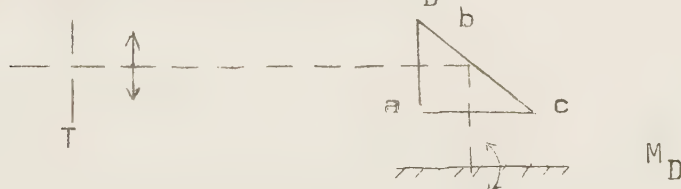
On procède aux opérations suivantes :

3. 211 Autocollimation sur la face a b du prisme



La face a b est perpendiculaire à l'axe, la face b c est à 45° de l'axe.

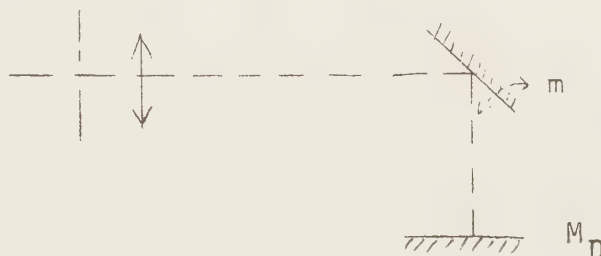
3. 212 Autocollimation sur M_D



La surface du miroir est parallèle à l'axe, c.à.d. à 45° de bc .

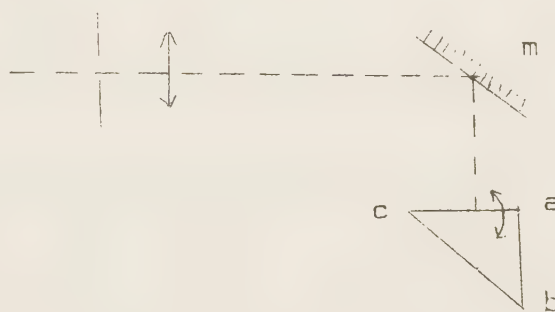


3.213 Le prisme étant remplacé par un miroir m , autocollimation sur M_D par réglage de m .



Le miroir m se trouve à 45° de l'axe.

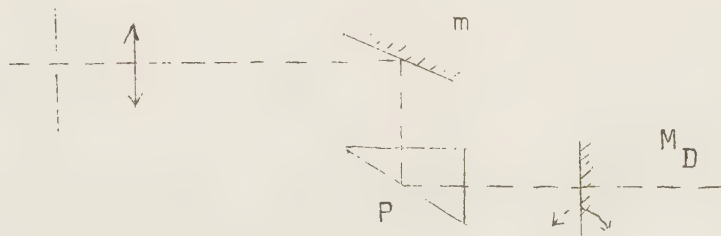
3.214 Le miroir M_D étant remplacé par le prisme, autocollimation sur $a c$.



La face $a c$ est parallèle à l'axe, c.à.d.

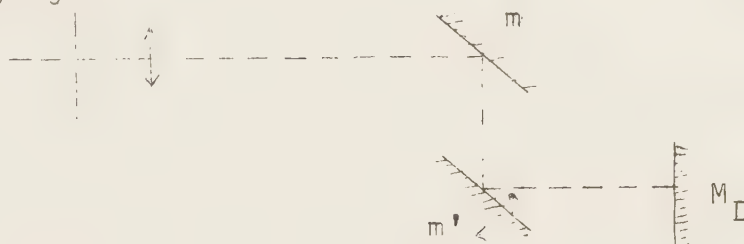
$c b$ est parallèle à m .

3. 215 Autocollimation sur M_D



M_D se trouve perpendiculaire à l'axe d'entrée.

3.216 Le prisme étant remplacé par m' , autocollimation sur M_D par réglage de m' .



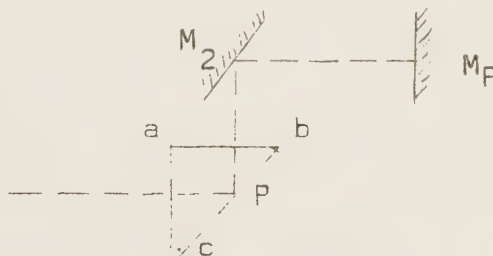
Le miroir m est alors strictement parallèle au miroir m' .

3.22 Réglage du miroir M_P perpendiculaire à l'axe (v.3.21)

Le réglage est réalisé également par autocollimation sur M_P à l'aide du système m, m' , qui déplace le faisceau d'entrée parallèlement à l'axe de rotation.

3.23 Réglage des miroirs M_1 et M_2 du premier boîtier.

Le dispositif m, m' est enlevé et remplacé par les miroirs M_1 et M_2 . L'autocollimation sur la surface du miroir M_P se fait en réglant le miroir M_2 parallèle à la face $c b$ du prisme P .



Le prisme P se trouve à la place du miroir intérieur M_1 du boîtier, et est réglé perpendiculaire à l'axe en faisant autocollimation sur la face $a c$. Il ne reste qu'à remplacer P par M_1 . En réglant M_1 parallèle à M_2 on fait à nouveau autocollimation sur M_P .

3.24 Réglage des miroirs M_3 et M_4

Le réglage se réalise comme pour les miroirs M_1 et M_2 .

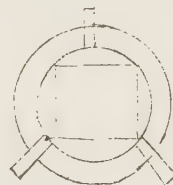
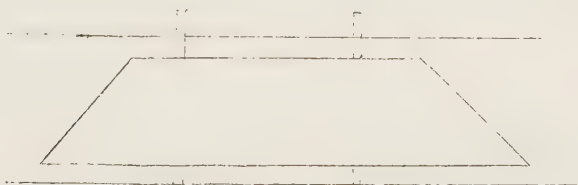
Pour vérifier le système entier, on fait autocollimation avec les quatre miroirs et un miroir perpendiculaire à l'axe à la sortie du système. Les miroirs sont parallèles deux à deux, et à 45° de l'axe optique, si l'image reste immobile lorsque le système est mis en rotation.

3.3 Réglage du Wollaston.

Le Wollaston a pour but de redresser l'image des secteurs, qui sans lui tournerait en même temps que le sélecteur.

Le prisme tourne avec une vitesse angulaire moitié de celle des systèmes de miroirs.

Pour que le faisceau à la sortie du Wollaston reste immobile, il faut faire coïncider l'axe de celui-ci avec l'axe de rotation des boîtiers. A l'aide d'un système de six vis, on peut régler l'inclinaison du prisme, jusqu'à



ce que le faisceau à la sortie soit fixe. Le faisceau est reçu sur un écran.

3.4 Réglage de la lunette L_2

Pour faire converger le faisceau sur la pupille de sortie, il faut placer celle-ci au foyer de la lentille L_2 . On a employé la même méthode que pour la détermination de la position du trou source.

La position de la lunette sur l'axe doit ensuite être déterminée, de façon que l'image des secteurs soit vue nette. L'oeil accommodant sur l'infini, ceci a lieu si les secteurs se trouvent dans le plan focal objet de la lentille L_2 .

En examinant le faisceau à la sortie de l'appareil, on règle ensuite la position de la lunette dans un plan vertical, et son inclinaison, de manière à faire coïncider son axe avec celui du système tournant.

3.5 Centrage du sélecteur

Le sélecteur doit être centré par rapport à l'axe de rotation, pour que la ligne de séparation des deux plages, correspondant aux demi-secteurs intérieurs et extérieurs, soit vue immobile.

Pour réaliser ce centrage, on ferme par exemple tous les demi-secteurs extérieurs, les demi-secteurs intérieurs étant ouverts, et on déplace le sélecteur dans un plan vertical par rapport à l'axe optique à l'aide d'un cavalier réglable, jusqu'à ce que l'oeil voit la ligne de séparation fixe. Pendant ce réglage le système boîtier Wollaston est, bien entendu, mis en rotation.

3.6 Equilibrage des boîtiers.

La marche du faisceau étant réglée, il ne reste qu'à équilibrer les boîtiers et le Wollaston afin de permettre des vitesses de rotation assez importantes.

4. MESURES

4.1 Préparations et calculs

4.11 Sélection des filtres

Pour convenir à nos mesures, les filtres doivent remplir plusieurs conditions.

Ils doivent définir dans le diagramme chromatique un triangle aussi étendu que possible, afin que le choix des couleurs pouvant être examinées ne soit pas trop limité. Pour cette raison il faut des filtres de couleur assez saturée, c.à.d. se trouvant aussi près que possible du lieu spectral.

D'autre part, il faut exiger une valeur suffisante de la transmission lumineuse pour ne pas perdre trop de lumière.

Une troisième condition consiste en un certain rapport entre les transmissions lumineuses des trois filtres. Ce rapport doit tenir compte du fait qu'il suffit en général d'une modification relativement petite du flux primaire bleu pour changer considérablement la couleur du mélange. Pour éviter des ouvertures du secteur bleu trop petites par rapport aux ouvertures des autres secteurs, une transmission lumineuse du filtre bleu plus faible que celle des autres est préférable.

Un dernier point à considérer est la stabilité des filtres quant à l'altération par exposition pendant une durée

prolongée à la lumière de la source de l'appareil.

Malheureusement il est difficile de trouver des filtres qui répondent parfaitement à toutes ces conditions. Cependant les filtres Kodak - Wratten, utilisés dans nos mesures, représentent un compromis admissible.

La mesure de la répartition spectrale des filtres a été effectuée sur un spectrophotomètre CARY 14. Les coefficients trichromatiques ont été calculés à partir des résultats obtenus tous les 5 nm pour des longueurs d'onde comprises entre 380 nm et 780 nm, en utilisant les valeurs $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ (C I E 1931) (progr.1).

Les caractéristiques des filtres utilisés sont données dans la table suivante :

n° du filtre	29	47	61
couleur	rouge profond	bleu	vert
transmission lumineuse	12,01%	1,07%	14,64%
coefficients trichromatiques			
x	0,7103	0,1383	0,2513
y	0,2896	0,0670	0,6972

4.12 Mise en place d'une couleur

Le mélange additif C des trois flux primaires est

PROGRAMME I

PAF

```
1=80 ABC
1=2 D
1 POSER I=1
2 LIRE Ai Bi Ci
3 FAIRE I=I+1
4 SI I<80 ALLER EN 2
5 LIRE N
6 SI N=1000 ALLER EN 20
7 POSER I=1 D0=0 D1=0 D2=0
8 LIRE M
9 CALCULER D0=D0+MAi
10 CALCULER D1=D1+MBi
11 CALCULER D2=D2+MCi
12 FAIRE I=I+1
13 SI I<80 ALLER EN 8
14 CALCULER S=D0+D1+D2
15 CALCULER X=D0/S
16 CALCULER Y=D1/S
17 CALCULER Z=D2/S
18 IMPRIMER AVEC 4 DEC RC N TAB X TAB Y TAB Z RC D1
19 ALLER EN 5
20 FIN
FIN
```

$A_i = S_A(\lambda) \overline{x}(\lambda) 1/K \Delta\lambda$
 $B_i = S_A(\lambda) \overline{y}(\lambda) 1/K \Delta\lambda$
 $C_i = S_A(\lambda) \overline{z}(\lambda) 1/K \Delta\lambda$
 $D_0 = X$
 $D_1 = Y$
 $D_2 = Z$
 $M = T(\lambda)$

caractérisé par ses composantes trichromatiques :

$$X_C = X_R + X_G + X_B$$

$$Y_C = Y_R + Y_G + Y_B$$

$$Z_C = Z_R + Z_G + Z_B$$

Les composantes trichromatiques sont liées aux coordonnées trichromatiques par :

$$X = \frac{x}{y} Y$$

$$Z = \frac{z}{y} Y$$

D'autre part les flux sont proportionnels aux angles d'ouverture α des secteurs¹⁶⁾ et aux facteurs de transmission

$$Y = kT\alpha$$

et pour des α petits

$$Y = kTA$$

avec

A : déplacement du spot sur la règle

$T \equiv \frac{Y}{Y_R}$: luminance relative rapportée à la
luminance du rouge

A_C étant tel que

$$Y_C = k T_R A_C$$

les coordonnées trichromatiques sont liées aux déplacements

A_R, A_G, A_B par le système d'équations linéaires :

$$A_C T_R \frac{x_C}{y_C} = A_R T_R \frac{x_R}{y_R} + A_G T_G \frac{x_G}{y_G} + A_B T_B \frac{x_B}{y_B}$$

$$A_C T_R \frac{y_C}{y_C} = A_R T_R \frac{y_R}{y_R} + A_G T_G \frac{y_G}{y_G} + A_B T_B \frac{y_B}{y_B}$$

$$A_C T_R \frac{z_C}{y_C} = A_R T_R \frac{z_R}{y_R} + A_G T_G \frac{z_G}{y_G} + A_B T_B \frac{z_B}{y_B}$$

soit

$$\begin{pmatrix} \frac{x_C}{y_C} & A_C \\ \frac{y_C}{y_C} & A_C \\ \frac{z_C}{y_C} & A_C \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} A_R \\ A_G \\ A_B \end{pmatrix}$$

Pour déterminer la luminance de travail, on ouvre le secteur rouge seul d'une certaine quantité, telle que le spot se déplace de la distance A_C sur la règle. Cette luminance, mesurée par un luminancemètre (Gamma scientifique), est maintenue constante pour toutes les couleurs examinées. Nous avons choisi un niveau de luminance nettement photopique, 270 cd/m^2 , correspondant à une valeur A_C de 500 mm. La résolution du système des trois équations fournit les valeurs de A_R , A_G , A_B pour chaque couleur

(programme II, mise en place des couleurs).

Résultats :

Couleur	Blanc I	Jaune II	Rouge III
A_R (mm)	102	90	393
A_G (mm)	290	331	72
A_B (mm)	530	90	217

Pour mettre ces couleurs en place, il suffit d'ouvrir les trois secteurs des quantités indiquées ci-dessus en déplacements (en mm) sur la règle.

4. 13 Rapport des variations d'ouverture des secteurs pour un déplacement dans une direction donnée à luminance constante à partir d'une couleur à examiner

Il s'agit maintenant de trouver les rapports entre les rotations des secteurs (ou les déplacements A_R , A_G , A_B du spot sur la règle) tels que le déplacement dans le diagramme chromatique, à partir de la couleur à examiner, obéisse aux conditions suivantes :

$$dY = 0 \quad (\text{luminance constante})$$

$$\frac{dx}{dy} \equiv m \quad (\text{direction donnée})$$

Pour faciliter les calculs, on détermine d'abord le

PROGRAMME II

```
IAF
i=2 j=3 XD
j=3 TY
i=3 A
1 POSER I=0
2 POSER J=0
3 LIRE  $X_{ij}$ 
4 FAIRE J=J+1
5 SI J≤3 ALLER EN 3
6 FAIRE I=I+1
7 SI I≤2 ALLER EN 2
8 POSER J=0
9 LIRE  $T_j$ 
10 LIRE  $Y_j$ 
11 FAIRE J=J+1
12 SI J≤3 ALLER EN 9
13 POSER I=0
14 POSER J=0
15 CALCULER  $D_{ij}=X_{ij}T_j/Y_j$ 
16 FAIRE J=J+1
17 SI J≤3 ALLER EN 15
18 FAIRE I=I+1
19 SI I≤2 ALLER EN 14
20 RESOUDRE  $\sum_3 DA$ 
21 POSER I=1
22 IMPRIMER AVEC 5 DEC RC  $A_i$ 
23 FAIRE I=I+1
24 SI I≤3 ALLER EN 22
25 FIN
FIN
```

$X_{ij} : i(0,1,2)=x,y,z$
 $j(0,1,2,3)=R,G,B,C$
 $Y_{ij} : j(0,1,2,3)=R,G,B,C$
 $T_j : j(0,1,2,3)=T_R, T_G, T_B, A_C$
 $A_i : i(0,1,2)=A_R, A_G, A_E$

100

100

100

100

100

système inverse du système donné page 45

$$\begin{pmatrix} A_R \\ A_G \\ A_B \end{pmatrix} = M^{-1} \begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix}$$

en inversant la matrice (programme III).

Le système de trois équations ainsi obtenu est différentié. En introduisant les deux conditions, on réduit les trois inconnues dA_R , dA_G , dA_B à une seule. Le programme IV permet de calculer les rapports dA_G/dA_R et dA_B/dA_R . La troisième inconnue est la valeur mesurée par l'observateur.

4.14 Calcul du seuil différentiel

L'exploitation des résultats consiste à trouver le seuil différentiel correspondant aux valeurs dA_R , dA_G et dA_B . Le problème est inverse du précédent. Il se résout en différentiant le système :

$$\begin{pmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} A_R \\ A_G \\ A_B \end{pmatrix}$$

en tenant compte des conditions de luminance constante

PROGRAMME III

```
PAF
i=8 j=9 A
i=9 C
1 POSER I=0
2 POSER J=0
3 LIRE Ai j
4 FAIRE J=J+1
5 SI J≤9 ALLER EN 3
6 FAIRE I=I+1
7 SI I≤8 ALLER EN 2
8 RESOUDRE  $\sum_{\theta} AC$ 
9 POSER I=1
10 IMPRIMER AVEC 5 DEC RC Ci
11 FAIRE I=I+1
12 SI I≤9 ALLER EN 10
FIN
FIN
```

A_{i j} : COEFFICIENTS DU SYSTEME D'EQUATIONS
C : COEFFICIENTS DE LA MATRICE

PROGRAMME IV

```

PAF
i=12 M
j=9 C
j=6 XY
i=12 j=6 KRS
1 LIRE C1C3C4C6C7C9
2 LIRE M0M1M2M3M4M5M6M7M8M9M10M11M12
3 LIRE X0X1X2X3X4X5X6 Y0Y1Y2Y3Y4Y5Y6
4 POSER J=0
5 POSER I=0
6 CALCULER Kij=(MiXj-Mi-Mj)/(Yj-MiXj)
7 CALCULER Rij=(C4+C6Kij)/(C1+C3Kij)
8 CALCULER Sij=(C7+C9Kij)/(C1+C3Kij)
9 IMPRIMER AVEC 5 DEC RC Kij TAB Rij TAB Sij
10 FAIRE I=I+1
11 SI I<12 ALLER EN 6
12 FAIRE J=J+1
13 SI J<6 ALLER EN 5
14 FIN
FIN

```

```

Mi=mi
Xj=xj          j INDICE DE LA COULEUR
Yj=yj          j INDICE DE LA COULEUR
Rij=dAG/dAR    i DIRECTION    j COULEUR
Sij=dAB/dAR    i DIRECTION    j COULEUR

```


et de pente donnée m . On obtient une fonction :

$$dx = f (dA_R, dA_G, dA_B)$$

d'où on tire

$$ds = \sqrt{1 + m^2} dx$$

avec ds = distance correspondant au seuil différentiel.

Le programme V (destiné à calculer dx et ds) calcule d'abord la moyenne et la déviation standard des mesures effectuées pour chaque sens de chaque direction.

DéviatiOn standard :

$$Q = \frac{\sum \left(A - \frac{\sum A}{n} \right)^2}{n - 1}$$

Ensuite il détermine les valeurs de dx et ds correspondant à la valeur moyenne $(\sum A)/n$ ainsi qu'à la déviation standard. On délimite donc pour chaque sens de chaque direction une zone d'incertitude pour les mesures. Le seuil différentiel autour d'une couleur peut être représenté par une courbe à l'intérieur de cette zone.

4.2 Exécution des mesures

4.21 Mise en place d'une couleur

Les secteurs extérieurs sont liés aux couronnes, elles-mêmes attachées aux bielles. On utilise, pour une position

PROGRAMME V

```

PAF
i=3 XYT
i=12 MRSP
i=12 j=1 LACQUDE
1 POSER I=0
2 LIRE  $X_i Y_i T_i$ 
3 FAIRE I=I+1
4 SI I<3 ALLER EN 2
5 POSER I=0
6 LIRE  $M_i R_i S_i P_i$ 
7 FAIRE I=I+1
8 SI I<12 ALLER EN 6
9 POSER I=0
10 POSER J=0
11 POSER N=0  $A_{ij}=0$   $C_{ij}=0$ 
12 LIRE  $L_{ij}$ 
13 SI  $L_{ij}=1000$  ALLER EN 18
14 FAIRE  $A_{ij}=A_{ij}+L_{ij}$ 
15 FAIRE  $C_{ij}=C_{ij}+L_{ij}^2$ 
16 FAIRE N=N+1
17 ALLER EN 12
18 CALCULER  $Q_{ij}=\sqrt{((C_{ij}-A_{ij}^2)/N)/(N-1)}$ 
19 CALCULER  $A_{ij}=A_{ij}/N$ 
20 CALCULER  $U_{ij}=(X_0 T_0/Y_0+X_1 T_1 R_1/Y_1+X_2 T_2 S_1/Y_2) Y_3^2 A_{ij}/(T_3 P_1(Y_3-M_1 X_3))$ 
21 CALCULER  $D_{ij}=U_{ij}\sqrt{(1+M_1^2)}$ 
22 CALCULER  $V_{ij}=(X_0 T_0/Y_0+X_1 T_1 R_1/Y_1+X_2 T_2 S_1/Y_2) Y_3^2 Q_{ij}/(T_3 P_1(Y_3-M_1 X_3))$ 
23 CALCULER  $E_{ij}=V_{ij}\sqrt{(1+M_1^2)}$ 
24 IMPRIMER AVEC 5 DEC RC  $A_{ij}$  TAB  $U_{ij}$  TAB  $D_{ij}$  RC  $Q_{ij}$  TAB  $V_{ij}$  TAB  $E_{ij}$  RC
25 FAIRE J=J+1
26 SI J<1 ALLER EN 11
27 FAIRE I=I+1
28 SI I<12 ALLER EN 10
29 FIN
FIN

```

P_i : SOIT 1 (ROUGE), SOIT R_i (VERT), SOIT S_i (BLEU) SELON LA COURONNE
 UTILISEE POUR LES MESURES
 L_{ij} : LECTURES i =DIRECTION
 $j=0$: >0
 $j=1$: <0

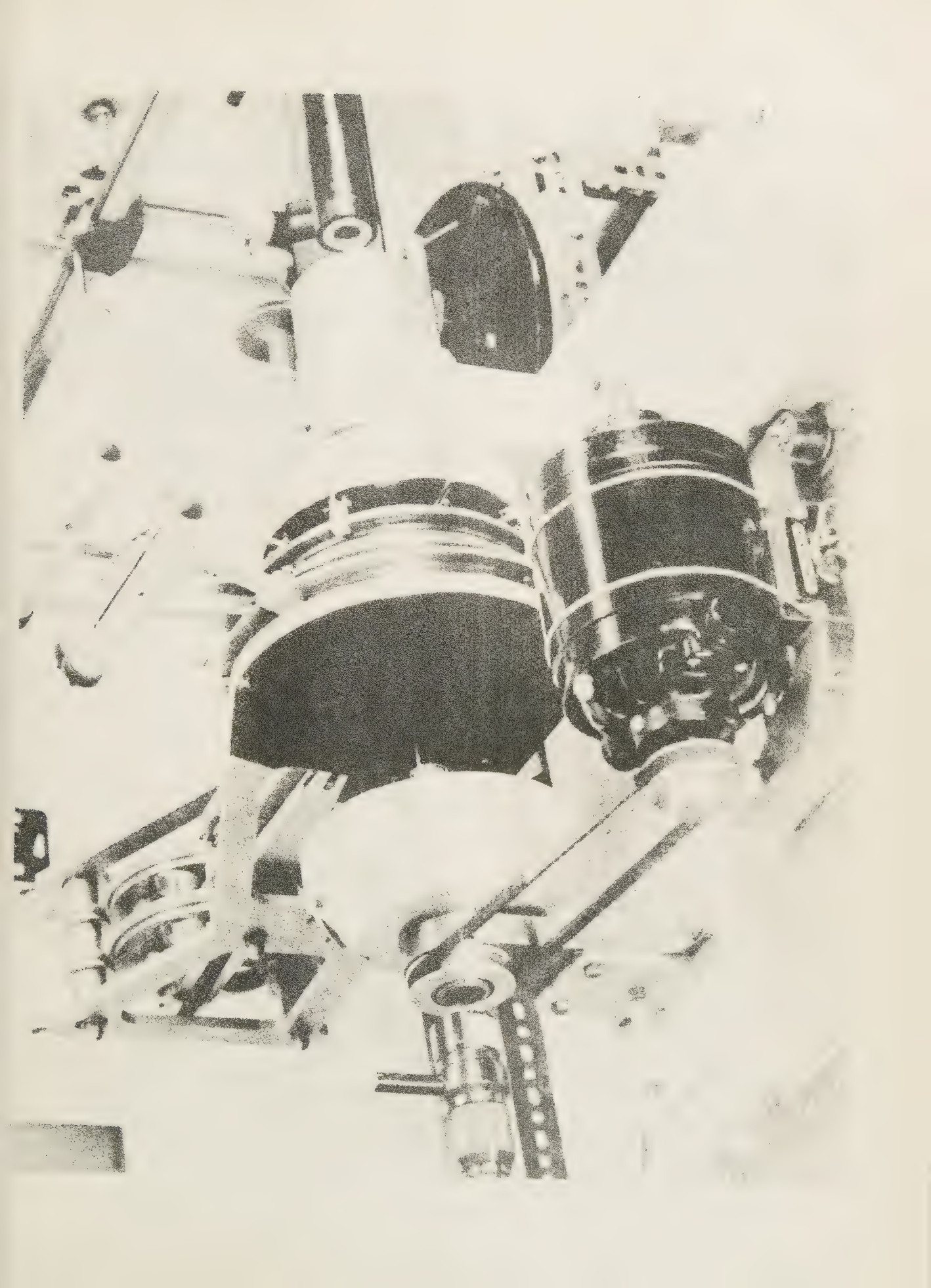
quelconque, mais non horizontale, de la lumière du disque, le réglage des tétons pour déplacer les bielles et ainsi les demi-secteurs extérieurs, sans changer la position choisie (arbitrairement) du disque. Au moyen des bielles, on ferme les demi-secteurs en les observant à travers un viseur placé à la sortie du Wollaston. On repère la position fermée à l'aide des spots correspondants sur la règle.

Ensuite on ouvre les demi-secteurs des quantités A_R , A_G , et A_B calculées par le programme II, toujours en se référant aux spots. Une fois la couleur en place, on aligne les demi-secteurs intérieurs dans le prolongement des demi-secteurs extérieurs.

Ce réglage doit être effectué très soigneusement, car la position des demi-secteurs intérieurs sert de repère pour la couleur à examiner par la suite. Les demi-secteurs intérieurs sont bloqués à l'aide d'une vis, pour éviter un déplacement au cours des mesures.

4.22 Mise à zéro des bielles

La première opération consiste à trouver la position des tétons (D) de chaque bielle pour laquelle les angles α et β (v.fig.5) restent nuls lors de la rotation de la commande unique; c.à.d. à régler de manière que les points D et C soient confondus.



Les bielles restent alors immobiles lorsqu'on manipule la commande unique.

Pour cette position des bielles, les trois spots sont mis à zéro sur la règle. Sans que la position des spots soit modifiée, et ainsi des trois couronnes, les demi-secteurs extérieurs sont détachés et amenés dans le prolongement des demi-secteurs intérieurs. Après ce réglage ils sont reliés aux couronnes. La position zéro des spots sur la règle indique alors d'une part que la commande unique n'entraîne pas de rotation des bielles, d'autre part que la couleur est en place.

Lorsque les boîtiers tournent, l'observateur voit un champ uniforme dans la lunette.

4.23 Mise en place d'une direction

Pour atteindre l'exactitude la plus grande possible, il faut s'arranger pour travailler avec l'angle γ le plus petit possible. On procède de la manière suivante:

- Déplacement du téton à l'extrémité de la bielle qui correspond au dA le plus grand calculé par le programme IV.
- Choix, à l'aide de la commande unique, de la valeur de ce déplacement dA , sur la règle. La position correspondante de la lumière sera conservée pour le reste de la mise en place de la direction.

- Déplacement des deux autres tétons jusqu'à obtention des 21 correspondants.

Si toutes les manipulations décrites ont été effectuées soigneusement, on peut retrouver maintenant la position de zéro en actionnant la commande unique, de manière que la lumière du disque soit horizontale. Les mesures peuvent être commencées.

4.24 Critère utilisé pour les mesures

Mac ADAM¹⁾ utilisait, pour ses travaux sur le seuil différentiel de couleur le critère de la déviation standard des égalisations avec un demi-champ d'une couleur constante de départ, d'un demi-champ de couleur variable. Etant donné qu'il considérait toute divergence entre la moyenne de ses égalisations et la couleur de départ comme significative d'un mauvais réglage, il trouvait forcément des résultats symétriques dans les deux sens d'une même direction.

Une deuxième méthode possible est celle des limites : en s'éloignant de la couleur de départ, on détermine une limite supérieure du seuil, au moment où l'oeil aperçoit une différence juste discernable entre les deux demi-champs; en revenant vers la couleur, on détermine une limite inférieure, au moment où la différence des deux demi-champs disparaît. On prend pour valeur du seuil la moyenne entre

ces deux mesures. Le critère utilisé dans nos mesures était celui de la différence juste discernable. Des essais avec la méthode des limites ont montré qu'il existe un facteur 0,7, à peu près constant entre les valeurs obtenues par la méthode des limites et les valeurs obtenues par la méthode de la différence juste discernable.

Pour pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux de Mac ADAM, il faut tenir compte d'un facteur 3 (donné par ce dernier) entre le seuil différentiel, c.à.d. la différence juste discernable, et la déviation standard d'égalisation (color match).

Afin de pouvoir utiliser une exploitation statistique des mesures, chaque observateur faisait alternativement 50 mesures dans le sens positif et 50 mesures dans le sens négatif d'une direction.

Pour éviter la fatigue, les mesures s'effectuaient en trois séances intercalées des deux observateurs C.LEROY et K.J.WILHELM. En outre cela présentait l'avantage que l'effet d'un léger dérèglement mécanique éventuel intervenait pour les deux sujets de la même manière, et avait plus de chance de se trouver compensé au cours des 50 mesures .

5. RESULTATS

5.1 Critique des résultats

Les courbes indicatrices (fig.7 à 12) donnent alternativement les résultats des deux sujets.

En réalité il s'agit de deux courbes indiquant une zone d'incertitude définie par la déviation standard autour de la moyenne des valeurs mesurées. Ceci implique que l'indicatrice "réelle" se trouve à l'intérieur de cette zone.

Seul le fait que la grandeur de cette zone reste constante à peu de chose près et que les points se placent de façon assez régulière, nous autorise à considérer la courbe moyenne comme plus ou moins caractéristique de l'allure des indicatrices des seuils. En particulier il nous paraît audacieux d'indiquer une allure de la courbe en cas d'écarts très grands. Des expériences ont montré que des mesures aberrantes dues par exemple à des causes d'ordre psychologique, ou à des effets de fatigue, sont en général dirigées vers les valeurs croissantes. Si on tient compte de ces valeurs dans l'exploitation, la courbe présente, pour cette direction, un pic accompagné d'une zone d'incertitude considérablement supérieure à celle des seuils voisins. Ainsi la constance de la largeur de cette zone peut être utilisée comme critère de confiance dans les résultats.

Couleur : I

$x = 0,305$

$y = 0,323$

Observateur : KJW

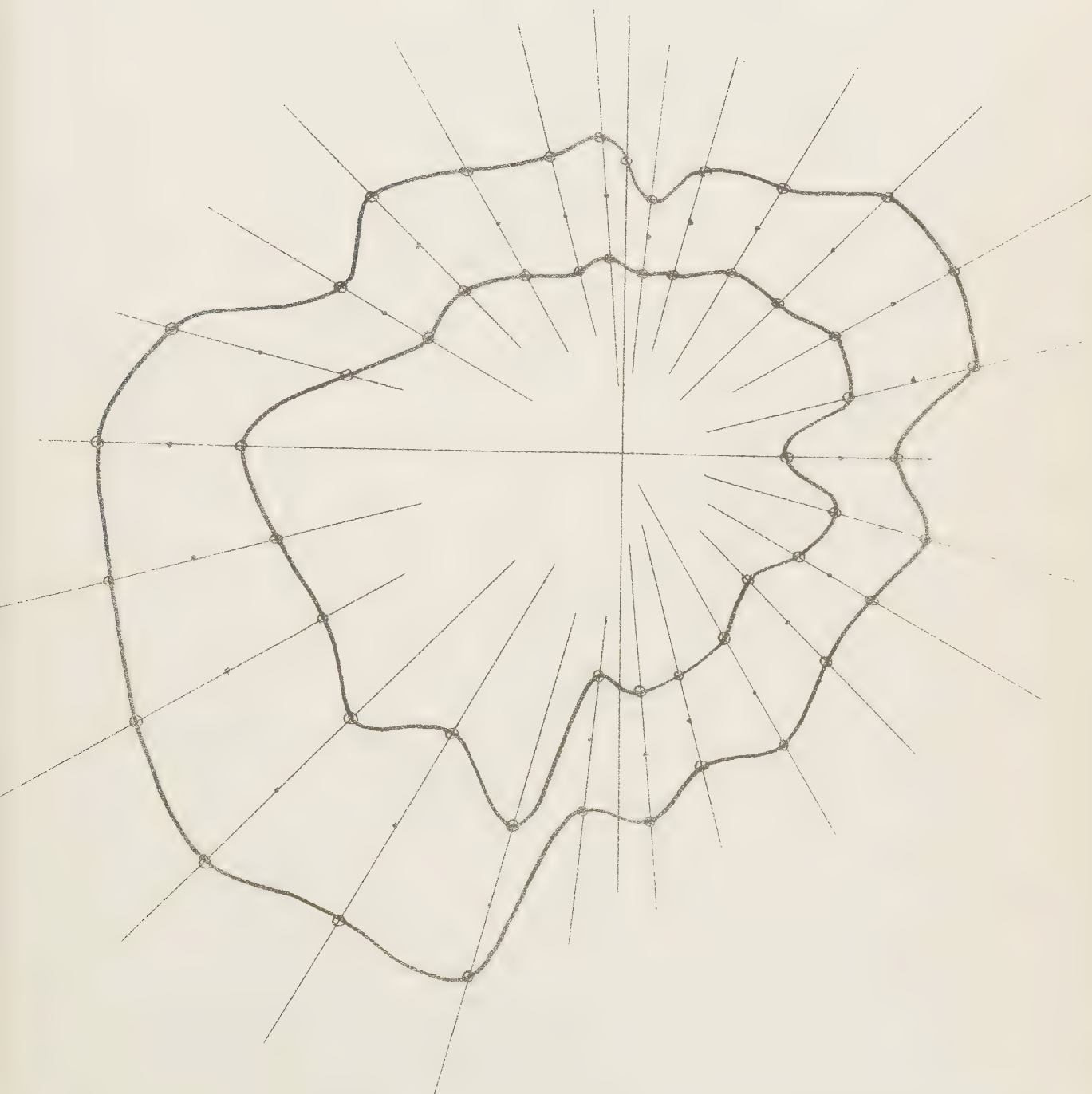


FIG. 7

0

0,05

Couleur : 1

Observateur : CL

$x = 0,305$

$y = 0,323$

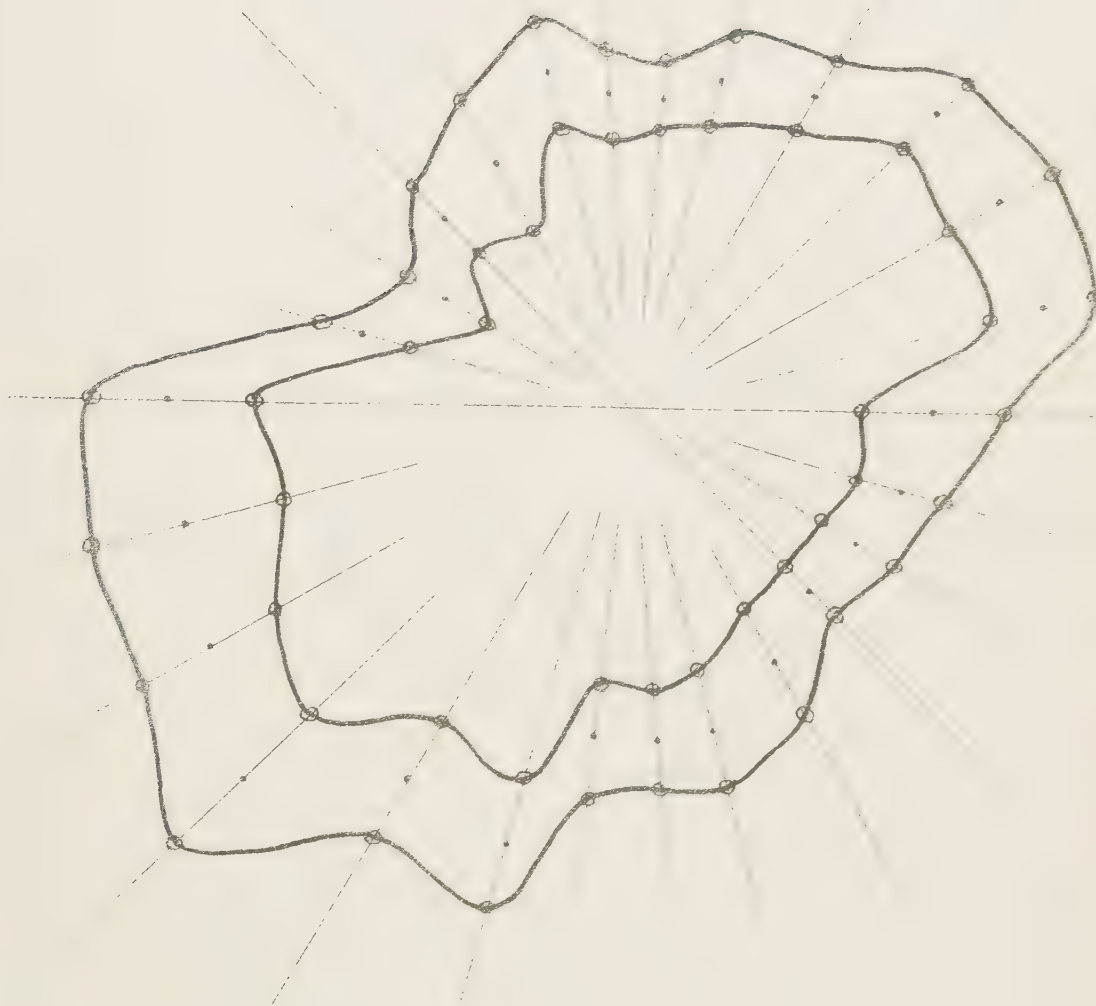


FIG. 8

0 0.25

Couleur : II

Observateur : KJW

$x = 0,380$

$y = 0,498$

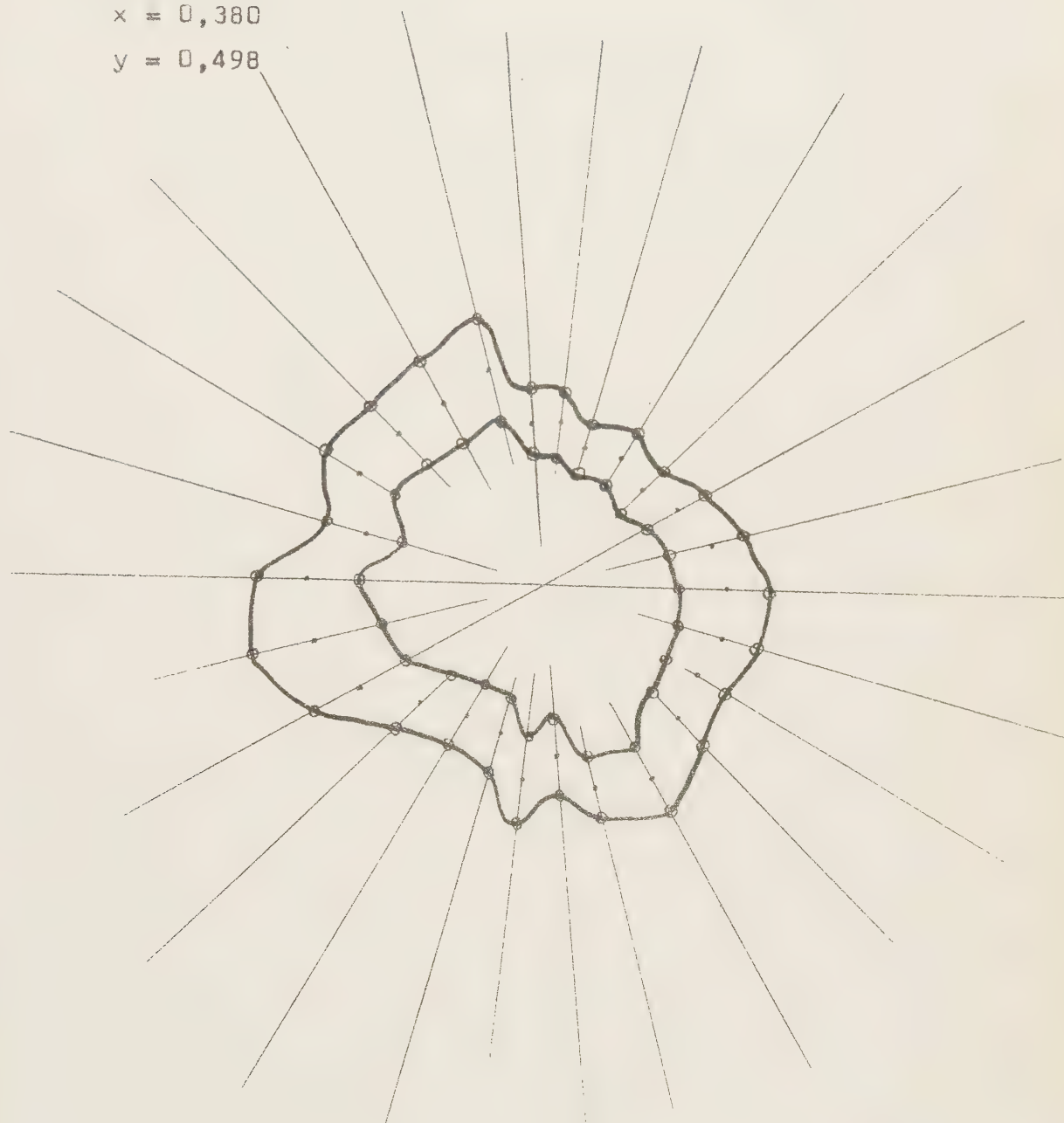


FIG. 9

0 0,05

Couleur : II

$x = 0,380$

$y = 0,498$

Observateur : CL

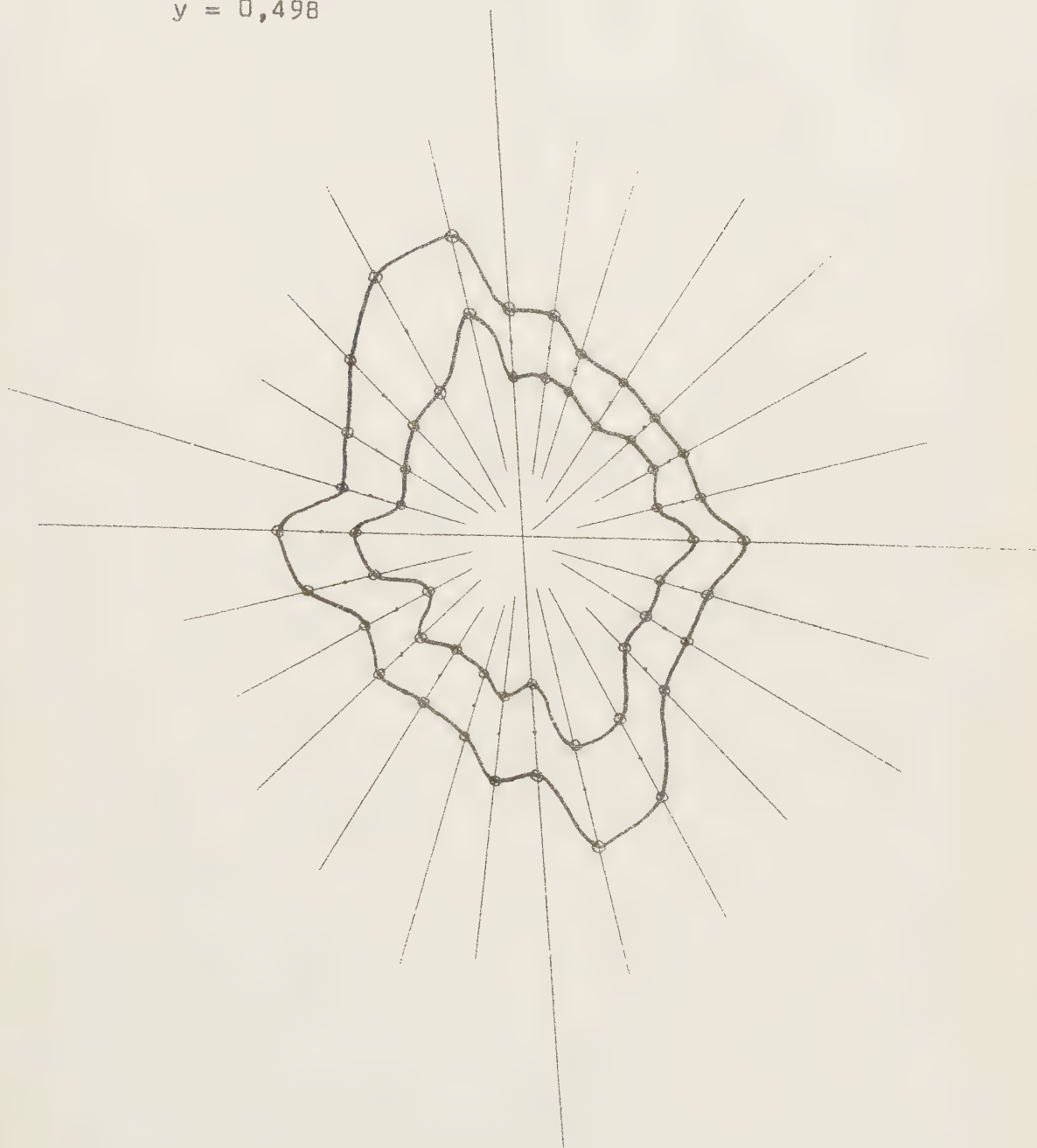


FIG. 10

0 ————— 005

Couleur : III

Observateur: K. W.

$x = 0,586$

$y = 0,283$

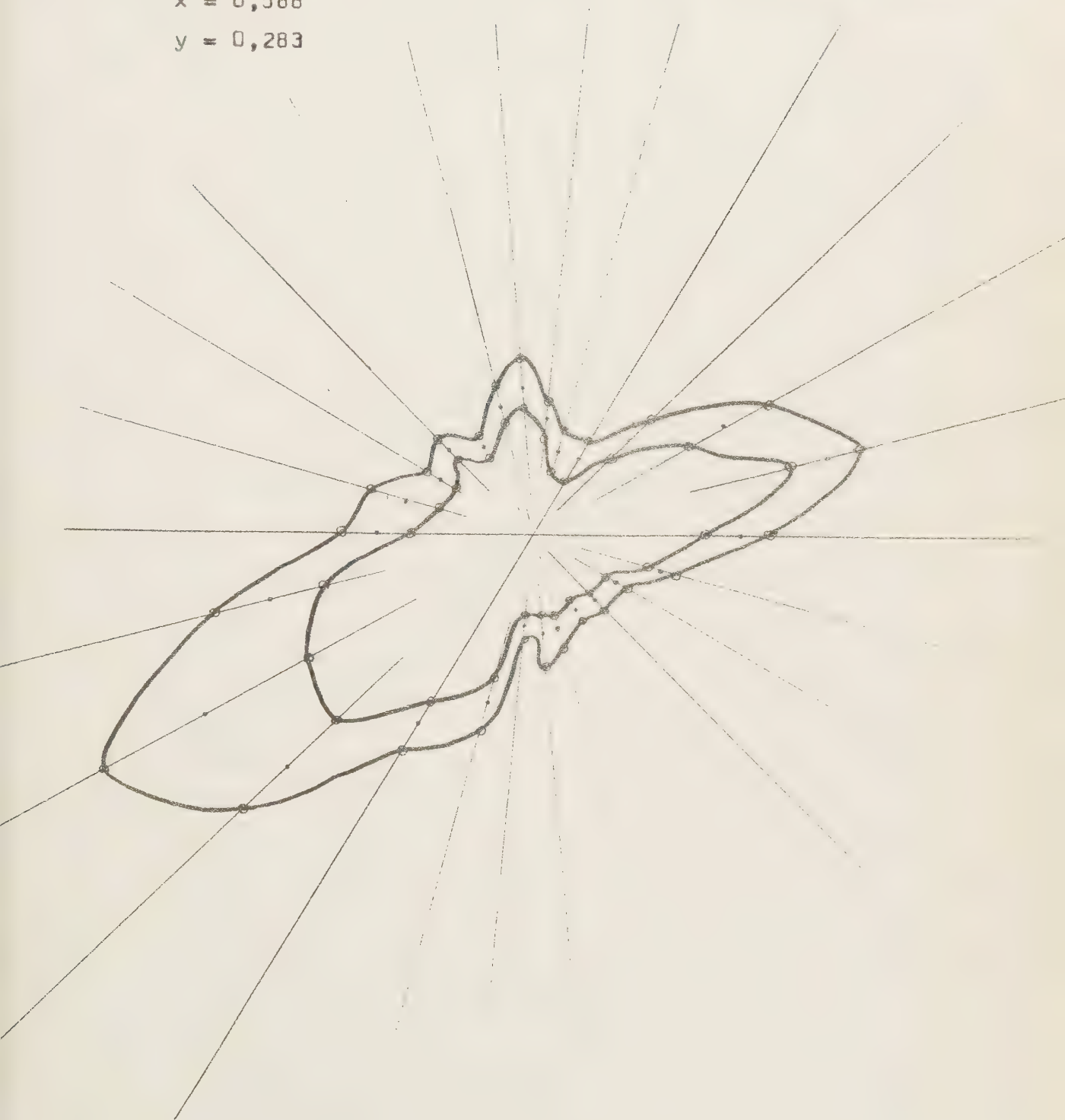


FIG. 11

0 0,05

Couleur : III

$x = 0,586$

$y = 0,283$

Observateur : CL

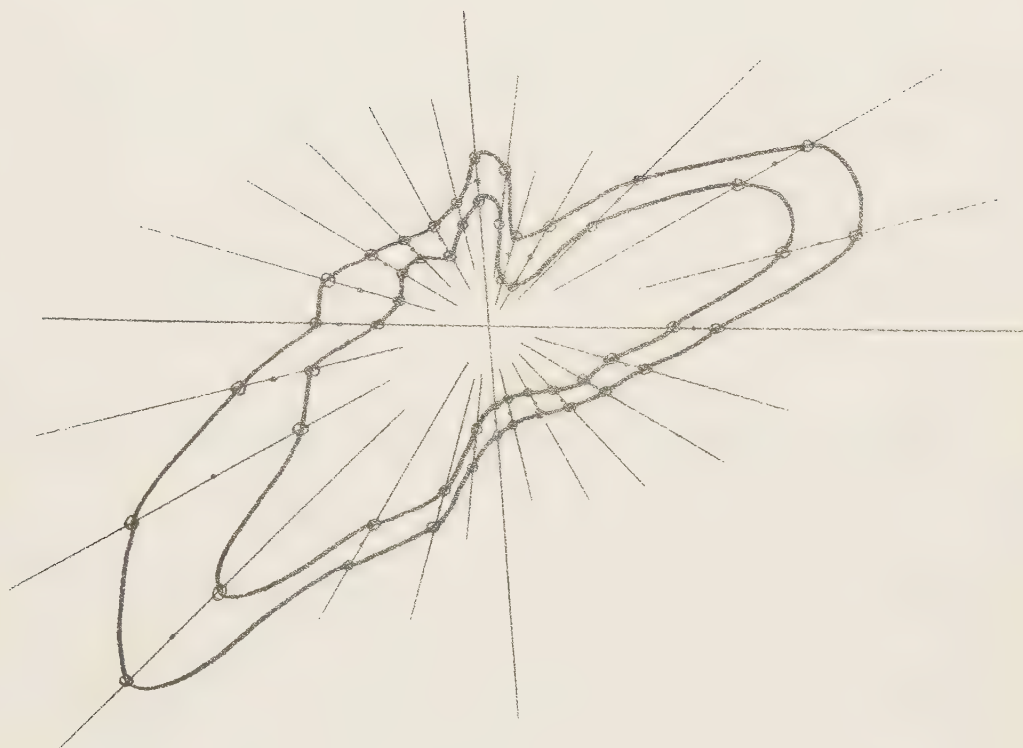


FIG. 12

0 0,05

Etant donné que les déviations standard de nos mesures restent pratiquement constantes en valeurs relatives, nous estimons avoir le droit de comparer les résultats des deux sujets.

Bien que le critère de jugement (différence juste discernable) soit assez subjectif, il est très étonnant que la grandeur absolue des indicatrices ne se distingue guère pour les deux observateurs. Le fait que les grandeurs des seuils restent pour ainsi dire proportionnelles nous semble montrer que les deux sujets ont constamment utilisé le même critère personnel.

5.2 Comparaison des résultats des deux sujets

L'allure des courbes révèle une double ressemblance. Les indicatrices des deux sujets pour une même couleur présentent des caractéristiques communes, telles que l'orientation et l'allure générales de la courbe. D'autre part chaque observateur possède certaines tendances particulières pour toutes les indicatrices des couleurs qu'il a examinées: allure plus ou moins rectangulaire respectivement ovale, légère rotation des directions de plus grands seuils par rapport à l'autre observateur.

5.3 Comparaison aux résultats de F. PARRA

La comparaison des résultats de F.PARRA avec les nôtres laisse apparaître une première différence claire : les parties pointues des courbes de PARRA dans les "directions privilégiées" sont beaucoup moins nettes dans nos résultats. D'autre part les zones d'incertitude sont plus petites dans nos mesures : déviation standard de l'ordre de 15%, tandis que les zones d'incertitude des résultats de PARRA sont très variables et que ses déviations standard atteignent parfois des valeurs dans l'ordre de grandeur des moyennes des mesures elles-mêmes (cf.fig.14).

L'indicatrice du jaune (fig 13) a été déterminée par F.PARRA sous les mêmes conditions, et en même temps que nos mesures de la même couleur (fig. 9 et 10).

5.4 Comparaison aux résultats de Mac ADAM

A première vue les résultats publiés par Mac ADAM (1942) pourraient sembler assez différents des nôtres¹⁾. Il faut remarquer d'abord que son critère de déviation standard conduisait forcément à des indicatrices plus petites; de plus la grandeur des seuils dépend largement des conditions d'expérimentation.

Comme Mac ADAM voulait donner surtout des renseignements sur la grandeur des zones de tolérance et sur l'orientation générale de celles-ci, il est justifié qu'il ait arrondi ses

Couleur : II

$x = 0,380$

$y = 0,498$

Observateur : FP (1969)

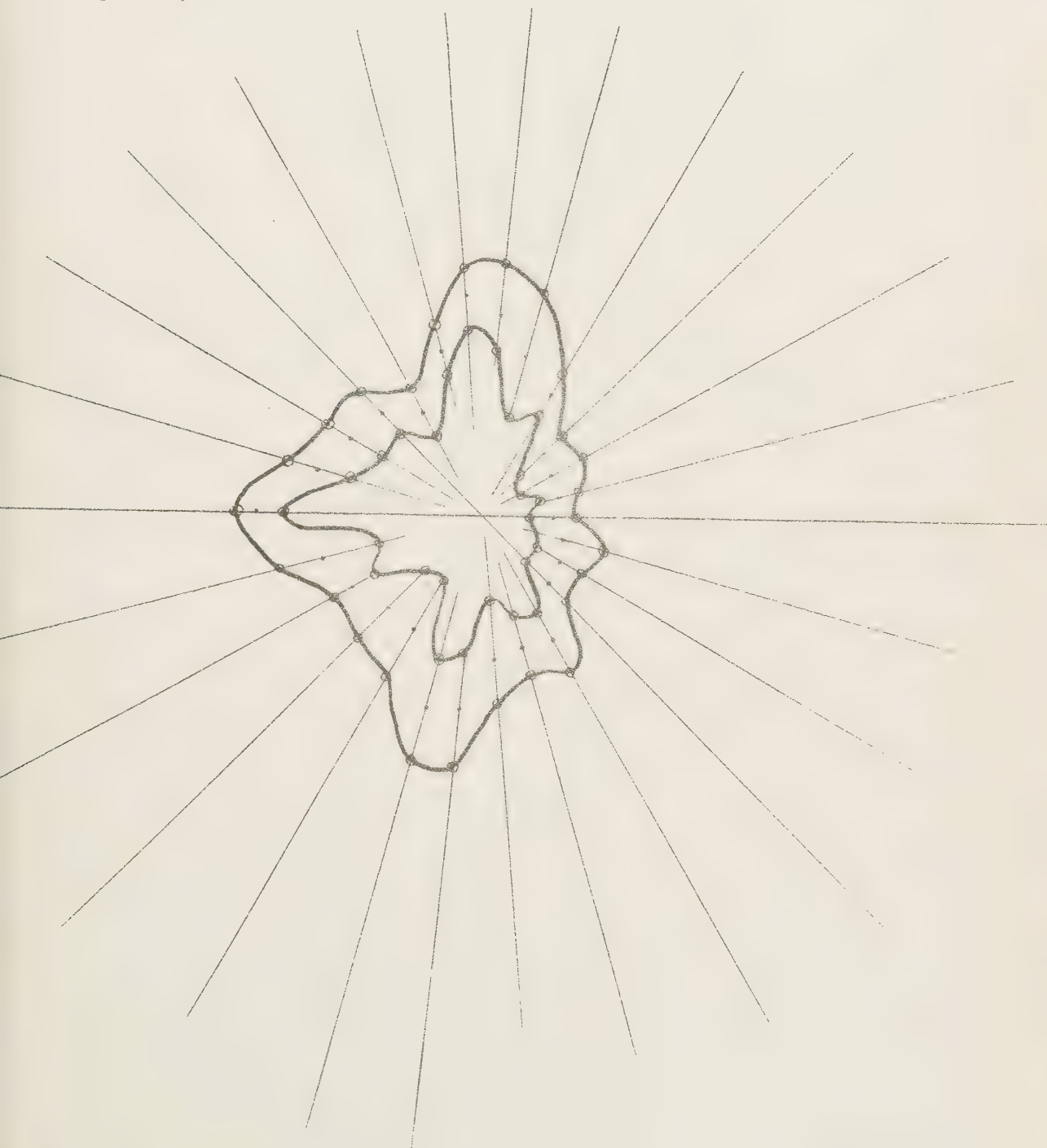


FIG. 13

0 ————— 0,05

Couleur : II

$x = 0,380$

$y = 0,498$

Observateur : FP (1967)



FIG. 14

0 0,01

résultats en traçant des ellipses par les extrémités des distances représentatives des seuils.

En examinant les points donnés dans la publication de 1942, on peut cependant constater que les ellipses ne représentent parfois qu'une courbe assez approximative. En traçant une courbe par ces points, on obtient des indicatrices beaucoup moins régulières, qui présentent des pointes dans l'ordre de grandeur des nôtres.

Un autre critère, la dissymétrie des courbes n'intervient pas dans les résultats de Mac ADAM; il symétrisait ses résultats en considérant que des décalages des moyennes de ses mesures par rapport à la couleur examinée étaient dus à un mauvais réglage.

Néanmoins les indicatrices résultant de nos mesures montrent effectivement des dissymétries. Le fait que Mac ADAM ait trouvé des ellipses de dimensions très différentes fait songer à une dissymétrie, le demi-axe le plus grand étant orienté vers les ellipses plus grandes, le plus petit dans l'autre sens. Bien sûr les résultats obtenus dans notre travail ne sont guère suffisants pour une analyse sérieuse de cette dissymétrie, mais les différences de dimension incitent au moins à entreprendre des expériences plus approfondies dans ce but.

5.5 Comparaison aux résultats de BROWN.

Les travaux publiés par BROWN en 1957 ⁶⁾ montrent des différences considérables entre les douze observateurs quant à la grandeur et à l'allure de leurs courbes, allure cependant uniquement dans le sens de forme différente des ellipses (excentricité, orientation). Malheureusement l'auteur a admis à priori, pour l'exploitation de ses mesures, des ellipsoïdes. L'ensemble des sections des ellipsoïdes avec le plan de luminance constante pour une même couleur, présente une assez grande variété. Ce fait montre qu'il est bien trop osé de tirer des conclusions générales des résultats que Mac ADAM avait trouvé en 1942 avec un seul observateur. Par conséquent il n'est pas surprenant de trouver des courbes orientées d'une manière différente de celles de son premier travail.

OBSERVATEUR : KJW

Etude des Seuils

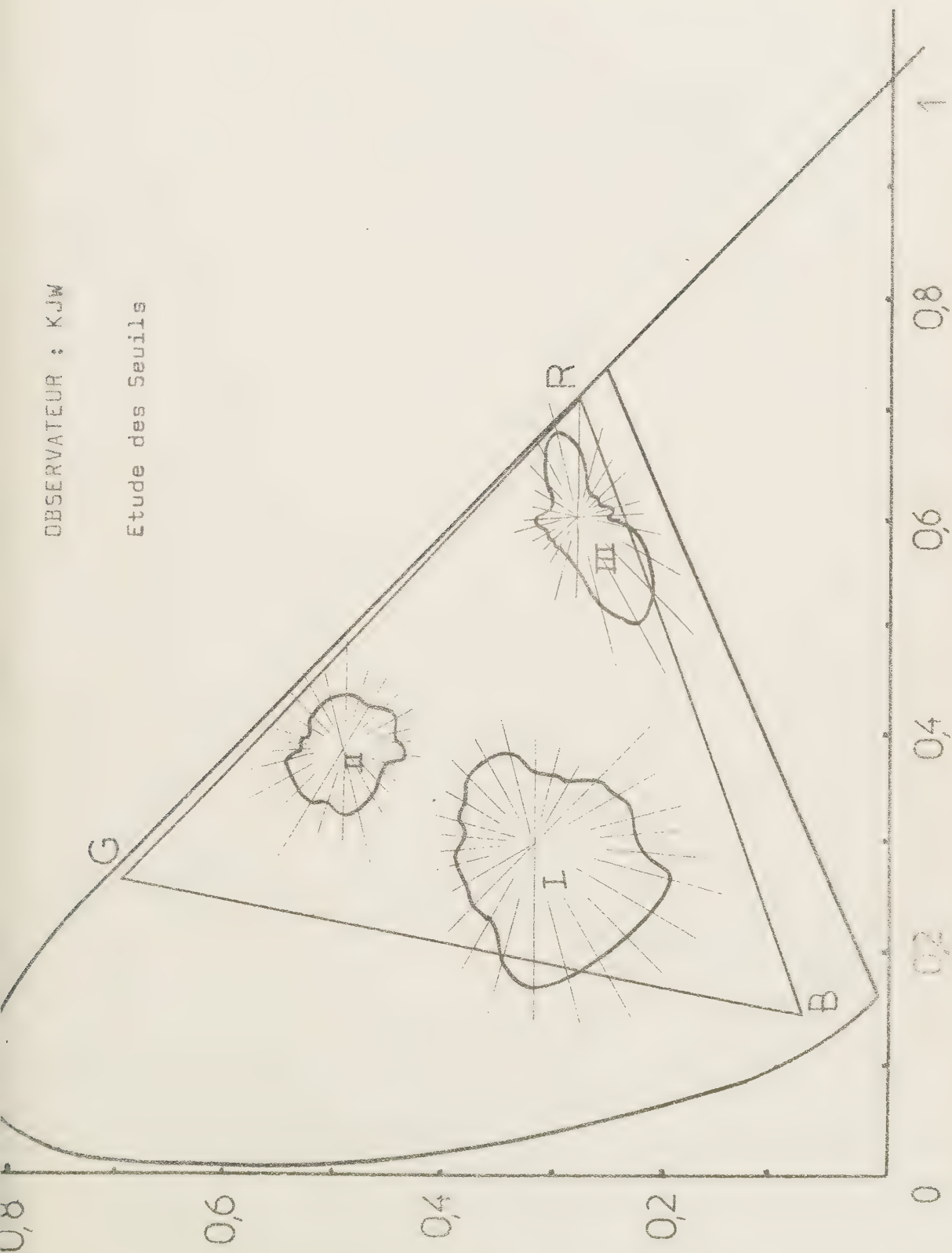


FIG. 15

0 0,1 0,25

OBSERVATEUR : CL

Etude des Seuils

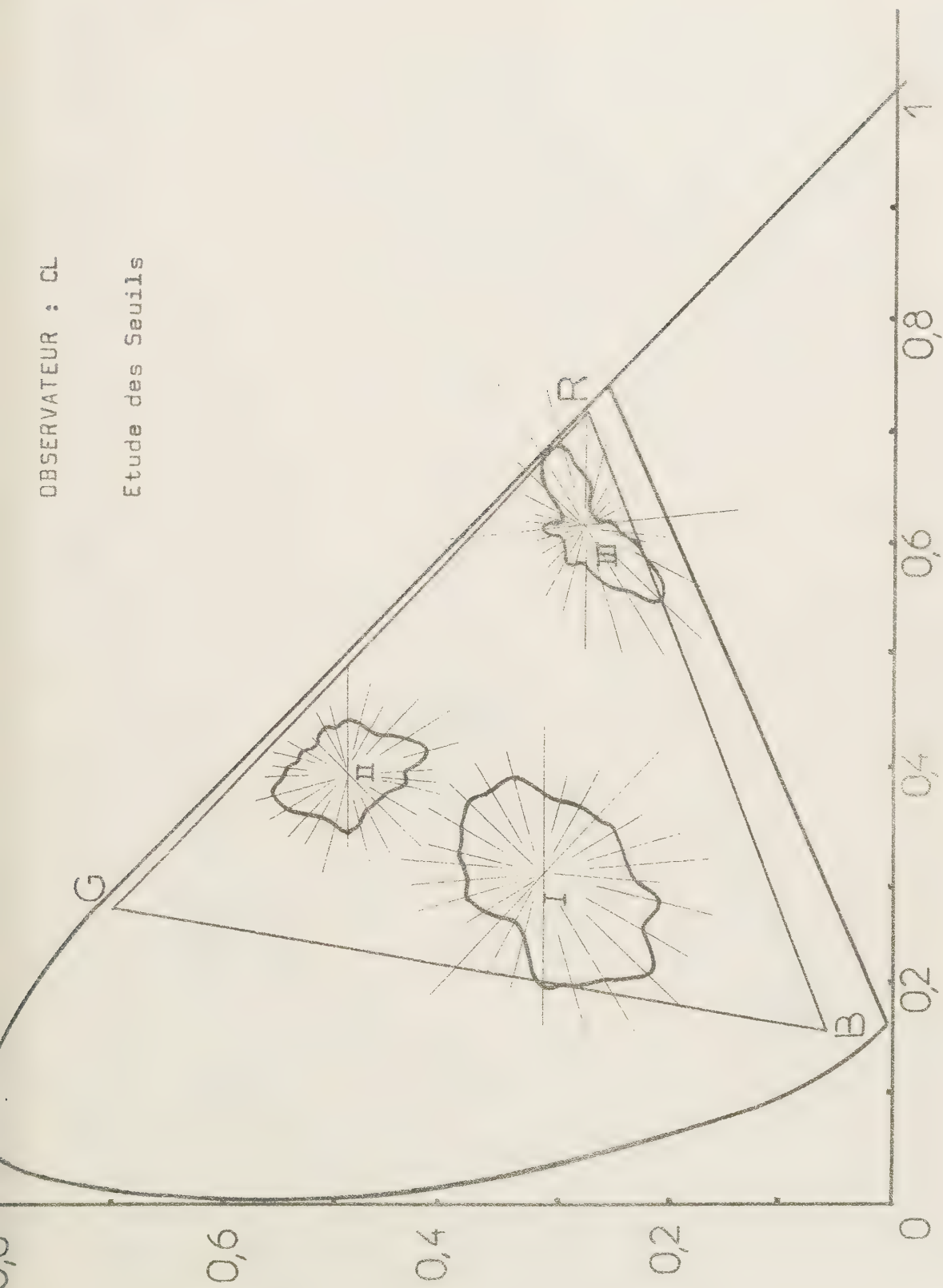


FIG. 16



ETUDE DES SEUILS SANS CHAMP DE CONTOUR

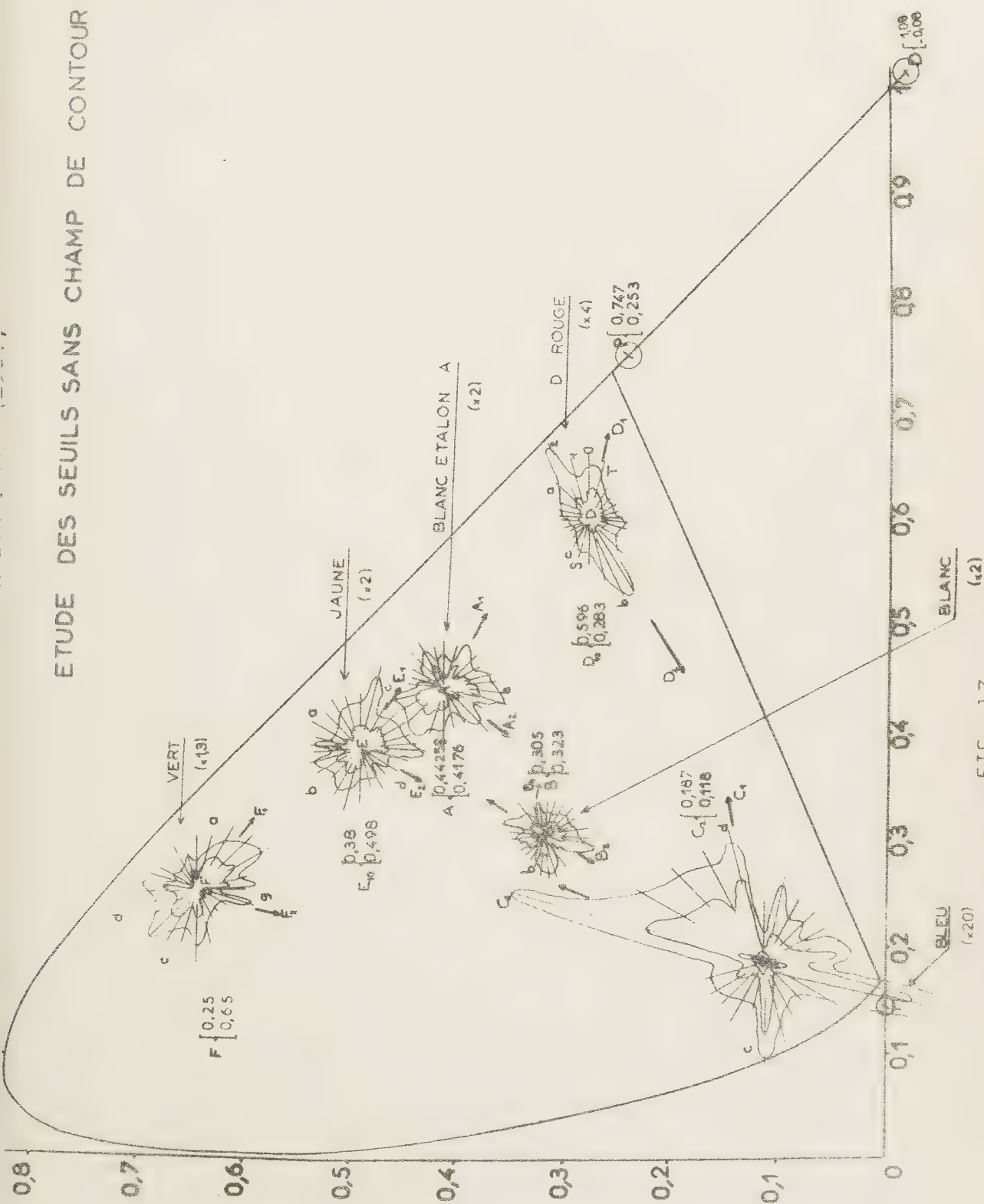


FIG. 17

6. CONCLUSION

Il est bien évident que ce travail ne prétend être qu'une ébauche assez limitée.

Néanmoins il nous a montré la démarche à suivre dans le futur, pour approfondir des idées jusqu'à l'instant plus ou moins incertaines.

En premier lieu, il serait souhaitable de faire une série de mesures considérablement plus étendue afin d'examiner les indicatrices des seuils dans tout le diagramme, et d'augmenter ainsi les possibilités d'exploiter ces résultats sur un plan plus général. Il est indispensable de modifier les paramètres des mesures : il faudrait examiner plus exactement l'influence de la variation de la luminance sur la grandeur et l'allure des courbes, celle de la variation de la grandeur du champ, celle d'un champ environnant (luminance et chromaticité de celui-ci), de la vision binoculaire, des facteurs psychologiques, des questions de fatigue, des questions d'adaptation. D'autre part il faudrait faire des expériences avec des sujets dichromates et monochromates.

Pour atteindre un but aussi ambitieux, il serait d'abord nécessaire, d'augmenter la performance de notre colorimètre différentiel, de mécaniser les manipulations assez longues, d'améliorer le processus d'exploitation arithmétique des résultats, etc...

Par la suite il faudra effectuer des mesures avec un nombre d'observateurs considérablement plus grand, afin d'arriver dans l'avenir à une synthèse plus générale et satisfaisante.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) MAC ADAM, D.L., Visual sensitivities to color differences in daylight. J.O.S.A., 32, (1942), 247
- 2) PARRA, F., Thèse présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris, 1967, Recherches sur le seuil différentiel de couleur.
- 3) LE GRAND, Y., Optique Physiologique, Tome II, Lumière et Couleurs, Ed. Rev. Opt. (1948), 170
- 4) DIN 5033, feuille 7, p.6
- 5) WRIGHT, W.D., The sensitivity of the eye to small colour differences. Proc. Phys. Soc. (London), 53 (1941), 93
- 6) BROWN, W.R.J. and MAC ADAM, D.L., Visual sensitivities to combined chromaticity and luminance differences. J.O.S.A., 39, (1945), 808
- 7) BROWN, W.R.J., Color discrimination of twelve observers. J.O.S.A., 47, (1957), 137
- 8) WRIGHT, W.D., Researches on normal and defective Colour Vision. London, H. Kimpton, 1946, 383 p. 233 fig.
- 9) BLACKWELL, H.R., Contrast thresholds of the human eye. J.O.S.A., 36, (1946), 624

- 10) MOON, P. and SPENCER, D.E., Visual data applied to lighting design. J.O.S.A., 34, (1944), 611
- 11) PRIEST, I.G. and BRICKWEDDE, F.G., The minimum perceptible colorimetric purity as a function of dominant wave length. J.O.S.A., 28, (1938), 133
- 12) WRIGHT, W.D., Researches on normal and defective colour vision. London, A. Hilger, 1944. 223 p. 65 fig.
- 13) BEDFORD, R.E. and WYSZECKI, G., Wavelength discrimination for point sources, J.O.S.A., 48, 1958, 129
- 14) TYNDALL, E.P.T., Chromaticity sensibility to wave length difference as a function of purity. J.O.S.A., 23, (1933), 15
- 15) LE GRAND, Y., réf. 3, p. 102
- 16) REEB, O., Grundlagen der Photometrie. Verlag G. Braun, Karlsruhe (1962), p. 107

Ce travail a été effectué au Laboratoire de Physique Appliquée aux Sciences Naturelles, du Muséum National d'Histoire Naturelle.

Je prie Monsieur le Professeur Y.LE GRAND, de bien vouloir accepter l'expression de mes remerciements pour l'accueil qu'il m'y a réservé.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Monsieur le Professeur O.REEB, Karlsruhe, qui m'a ouvert la voie pour l'exécution de mes recherches dans ce laboratoire.

J'aimerais exprimer ma gratitude à Monsieur PARRA, qui m'a constamment soutenu et guidé de ses conseils, lors de la préparation de ce travail.

Je tiens à remercier Mademoiselle Claudine LEROY à laquelle je dois une collaboration toujours fructueuse tant sur des problèmes scientifiques que sur tout autre sujet.

Je remercie également tous les membres du Laboratoire, en particulier Monsieur RAINASSE qui a toujours fait preuve de beaucoup de patience en m'aidant à la réalisation mécanique de mes idées parfois assez vagues, Madame BERTRAND qui m'a beaucoup aidé à me familiariser avec la langue française, Madame MARTINET et Monsieur TOUZEAU qui ont effectué la réalisation de ce rapport.

FACULTÉ DES SCIENCES
DE PARIS

9, QUAI SAINT BERNARD - PARIS V*

SERVICE DE LA SCOLARITÉ

Bureau des Enseignements du 3^e Cycle

TÉLÉPHONE : 336-25-25 - P

PERMIS D'IMPRIMER

DOCTORAT : D'UNIVERSITÉ

THESE DE :

Nom : Monsieur WILHELM

Prénoms : Klaus, Jürgen

Né (e) le 14 Mai 1944 à REMSCHEID ^{Dép^t} (Allemagne)

SUJETS

1^{ère} THESE : "Quelques aspects du problème des seuils différentiels
de couleur".

2^e THESE (Propositions faites par la Faculté) : "Métamérisme en cas
d'anomalie chromatique".

Vu et approuvé

Paris, le 20 Décembre 1969

Le Doyen de la Faculté
des Sciences de Paris

Vu et permis d'imprimer

Paris, le

Le Recteur de l'Académie
de Paris



